



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

Katedra Automatyki

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Analiza i projektowanie układów sterowania
sterami strumieniowymi statków
z zastosowaniem systemu z bazą wiedzy**

Autor:

mgr inż. Andrzej Mikołaj Kopczyński

Promotor:

dr hab. inż. Ryszard Arendt, prof. nadzw. PG

Gdańsk, 2015

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	2
1.1 Cel rozprawy	3
1.2 Teza rozprawy	4
2. OKRĘTOWE STERY STRUMIENIOWE	4
3. ANALIZA STRUKTUR STERÓW STRUMIENIOWYCH I STOSOWANYCH ELEMENTÓW SKŁADOWYCH	5
3.1 Wprowadzenie.....	5
3.2 Przykładowa struktura steru strumieniowego – struktura z rozruchem bezpośrednim	7
3.3 Podsumowanie	7
4. BIBLIOTEKA MODELI MATEMATYCZNYCH ELEMENTÓW SKŁADOWYCH STERÓW STRUMIENIOWYCH	8
4.1 Wprowadzenie.....	8
4.2 Model matematyczny silnika indukcyjnego uwzględniający straty w żelazie.....	9
4.3 Redakcja modelu matematycznego silnika indukcyjnego uwzględniającego straty w żelazie	12
4.4 Podsumowanie	12
5. DOBÓR PARAMETRÓW I WERYFIKACJA MODELI ELEMENTÓW SKŁADOWYCH	14
5.1 Wprowadzenie.....	14
5.2 Zdefiniowanie problemu optymalizacji parametrów	14
5.3 Charakterystyki wzorcowe	15
5.4 Miary odległości charakterystyki modelowanej i wzorcowej	15
5.5 Algorytm genetyczny	16
5.6 Obliczanie procentowej adekwatności modelu	17
5.7 Dobór parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego	17
5.8 Podsumowanie	18
6. APLIKACJA SYSTEMU EKSPERTOWEGO WSPOMAGAJĄCEGO PROJEKTOWANIE UKŁADÓW STERÓW STRUMIENIOWYCH	18
6.1 Wprowadzenie.....	18
6.2 Organizacja hybrydowego systemu ekspertowego wspomagającego dobór elementów i badanie układów sterów strumieniowych	19
6.3 Algorytm aplikacji doboru struktur i elementów sterów strumieniowych.....	20
6.4 Interfejs graficzny użytkownika aplikacji doboru struktur i elementów sterów strumieniowych	22
6.5 Biblioteka struktur sterów strumieniowych	23
6.6 Baza elementów	23
6.7 Baza wiedzy	24
6.8 Algorytm aplikacji symulacyjnej	24
6.9 Aplikacja przetwarzająca wyniki z symulacji	25
6.10 Podsumowanie	25
7. BADANIA WYBRANEJ STRUKTURY STERU STRUMIENIOWEGO STATKU	26
7.1 Wprowadzenie.....	26
7.2 Założenia/parametry początkowe.....	27
7.3 Badania symulacyjne oraz ocena wyników symulacji.....	27
7.4 Raport końcowy systemu ekspertowego	29
7.5 Podsumowanie	30
8. ZAKOŃCZENIE	30
9. BIBLIOGRAFIA	33

1. WSTĘP

Przedmiotem rozprawy są zagadnienia związane z modelowaniem podsystemu steru strumieniowego statku, układów sterowania sterami strumieniowymi statku oraz częściową automatyzacją procesu projektowania.

Współczesny statek składa się z systemów takich jak: system nawigacji, system energetyczny oraz system ładunkowy. Każdy z tych systemów podlega kompleksowej automatyzacji, co umożliwia automatyczne sterowanie układami oraz urządzeniami okrętowymi bez udziału człowieka. Zarówno aspekty ekonomiczne, jak i aspekty związane z poprawą bezpieczeństwa na morzu oraz na wodach ograniczonych, postulują zmniejszenie liczby załogi na statku, jednak obecnie nie są jeszcze budowane statki bezzałogowe [33, 34]. Poszukiwanie lepszych metod projektowania przyczynia się do powstawania coraz doskonalszych projektów, a co za tym idzie nowocześniejszych, bezpieczniejszych i tańszych w eksploatacji statków.

Problematyka związana z procesami zachodzącymi podczas pracy urządzeń elektroenergetycznych na statkach (np. rozruchu steru strumieniowego) jest nadal aktualna, co potwierdzają projektanci z biura konstrukcyjnego Stoczni Remontowej, jak i biura konstrukcyjnego ABB. Dobór urządzeń wchodzących w skład systemów elektroenergetycznych stanowi jedno z zadań projektowych. Z uwagi na ograniczenia czasowe oraz obawy o ewentualne błędy projektowe, brak odpowiednich narzędzi wspomagających projektowanie z wykorzystaniem sztucznej inteligencji oraz możliwości dokonania odpowiednich obliczeń/symulacji, gotowe zespoły urządzeń dostarczają producenci, gwarantując ich poprawną pracę w systemie elektroenergetycznym statku. Zbudowanie systemu wspomagającego proces doboru urządzeń przyczyni się do obniżenia kosztów projektowania, jak i budowy statku (wg ekspertów szacunkowy koszt zestawu urządzeń może być obniżony nawet o 20%). Dlatego też poszukiwane są coraz lepsze metody oceny, analizy oraz tworzenia nowych rozwiązań projektowych.

Problematyka związana z poprawą jakości sterowania oraz projektowania sterów strumieniowych jest nieustannie aktualna, ponieważ:

- stery strumieniowe są powszechnie stosowane w nowo projektowanych statkach,
- w remontowanych statkach instaluje się często dodatkowe stery strumieniowe,
- w remontowanych statkach pojawiają się problemy związane ze zwiększeniem obciążenia elektrowni statku po zainstalowaniu nowych urządzeń,
- zastosowanie sterów strumieniowych obniża koszty eksploatacji statków oraz poprawia bezpieczeństwo na wodach ograniczonych,
- w przypadku jednostek specjalnych np. badawczych, stery strumieniowe mogą być używane również w warunkach morskich, podczas dynamicznego pozycjonowania statku,
- czasochłonność projektowania jest jednym z elementów decydujących o wysokich kosztach gotowego produktu jakim jest statek,
- projektowanie jest procesem skomplikowanym, wymaga wykonania wielu obliczeń oraz dobrania wielu elementów składowych,
- projektowanie przez wyspecjalizowane jednostki/narzędzia pozwala zaoszczędzić czas oraz wyeliminować błędy projektowe, a tym samym obniżyć koszt całego projektu,
- zestawienie elementów składowych podsystemu elektroenergetycznego w biurze projektowym, z pominięciem zewnętrznych pośredników, może przyczynić się do obniżenia kosztów projektowania,
- błędy powstałe w procesie projektowania są trudne do usunięcia, co niesie za sobą dodatkowe koszty.

Istnieje wobec tego potrzeba komputerowo wspomaganej automatyzacji procesu projektowania sterów strumieniowych i układów sterowania.

Dotychczasowy brak znaczącej roli systemów ekspertowych w dziedzinie projektowania podsystemów okrętowych jest związany z trudnościami integracji istniejącego oprogramowania projektowego z systemami ekspertowymi, trudnościami w reprezentacji wiedzy w postaci reguł oraz wysokimi kosztami wdrażania takich systemów [55]. Poniesione koszty na opracowanie kompletnego systemu ekspertowego wspomagającego proces projektowania mogą nie przynieść adekwatnych oszczędności.

Przegląd literaturowy pokazuje, że tematyka związana z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w zastosowaniach morskich jest aktualna i budzi zainteresowanie. Tematyka podjęta przez autora rozprawy w dużej części mogłaby być włączona w ogólnoeuropejskie projekty finansowane przez Komisję Europejską [72, 76]:

- projekt VRS – VRShips-ROPAX 2000 (Life-Cycle Virtual Reality Ship Systems) nakierowany na opracowanie zintegrowanego oprogramowania wspomagającego projektowanie i symulacje oraz poprawę konkurencyjności rozdrobnionego europejskiego przemysłu,
- projekt EUROMIND (jeden z sześciu projektów w ramach sieci dotyczącej standardów i innowacji Europe INNOVA), nakierowany na udoskonalenie współpracy w europejskim okrętowym łańcuchu dostaw poprzez połączenie systemów cyfrowych przy użyciu standardów otwartych,
- obecnie realizowane projekty związane z zastosowaniem sztucznej inteligencji w zastosowaniach morskich w ramach 7 programu ramowego Unii Europejskiej np. ADOPT (Advanced decision support system for ship design, operation and training), RISPECT – (Risk-Based Expert System for Through-Life Ship Structural Inspection and Maintenance and New-Build Ship Structural Design).

Poprawa procesu projektowania może zostać zrealizowana poprzez wykorzystanie elementów sztucznej inteligencji (system ekspertowy, algorytmy genetyczne) [12, 15, 27, 38, 50], a także dzięki poprawie jakości sterowania [33, 48, 56]. Proponowany system wspomagania projektowania i sterowania sterów strumieniowych oparty jest na klasycznym systemie ekspertowym. Jednak system ten nie wnioskuje jedynie na podstawie zebranej i spisanej wcześniej wiedzy eksperckiej, ale dodatkowo wykorzystuje badania symulacyjne on-line oraz pośrednio algorytmy genetyczne i na tej podstawie dopiero proponuje wstępne rozwiązania projektowe. Przyjęto, że na potrzeby systemu ekspertowego wykorzystane zostaną istniejące modele matematyczne. W literaturze [5, 16–18, 20–23, 28, 31, 35, 37, 39, 41, 42, 44, 46, 49, 51, 53–54, 57] znajdujemy wiele opisów matematycznych elementów mogących wchodzić w skład struktur sterów strumieniowych np. generator, silnik indukcyjny, wał napędowy, śruba nastawna itp. Odpowiednie zestrojenie modeli wraz z dobranymi parametrami oraz umożliwienie połączenia ich w całościowe struktury jest kluczem do lepszego zrozumienia zjawisk, jakie zachodzą w nowo zaprojektowanych i jeszcze niezbudowanych podsystemach statków.

1.1 Cel rozprawy

Celem niniejszej rozprawy jest opracowanie procedur wspomagających analizę i projektowanie układów sterowania sterów strumieniowych, opartych na badaniach symulacyjnych i systemie z bazą wiedzy. Procedury po zaimplementowaniu w aplikacji komputerowej będą tworzyć narzędzie wykorzystywane w toku projektowania podsystemów elektroenergetycznych statków. Procedury te powinny umożliwić zastosowanie w praktyce badań symulacyjnych, a więc bezpośrednie wykorzystanie modeli matematycznych przez

projektantów, w celu określenia przydatności zestawianych struktur. Postawiony cel pracy obejmuje zagadnienia związane z utworzeniem aplikacji systemu ekspertowego. Niezbędnymi elementami składowymi proponowanego systemu są:

- baza elementów mogących wchodzić w skład projektowanych struktur,
- biblioteka modeli matematycznych,
- szkieletowy system ekspertowy,
- zbiór reguł dotyczących projektowania,
- aplikacja symulacyjna,
- zbiór kryteriów oceny wyników symulacji,
- zbiór kryteriów oceny proponowanych rozwiązań projektowych,
- interfejs komunikacji użytkownika z systemem ekspertowym.

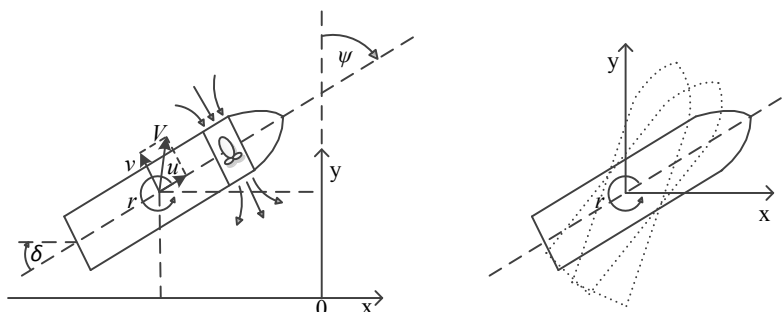
1.2 Teza rozprawy

W rozprawie sformułowano następującą tezę:

Możliwe jest wykorzystanie informacji pozyskanych od ekspertów oraz uzyskanych w wyniku badań symulacyjnych jako źródła wiedzy, niezbędnej do funkcjonowania systemu z bazą wiedzy, wspomagającego częściową automatyzację procesu projektowania oraz doboru układów sterowania sterów strumieniowych statków, w postaci pozwalającej na jego bezpośrednie i praktyczne wykorzystanie przez projektantów, konstruktorów, jak i studentów.

2. OKRĘTOWE STERY STRUMIENIOWE

Wykorzystanie sterów strumieniowych do sterowania statkiem nie jest nowym pomysłem. Już w 1844 roku Robert Foulerton zastosował w statku *Stockton Cillier* śrubę napędzaną siłą ludzkich mięśni umieszczoną w poprzecznym tunelu. Rozwój techniki pozwolił dopiero 100 lat później na efektywne wykorzystanie tego wynalazku. W Polsce stery strumieniowe są stosowane od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Początkowo sterowanie sterami strumieniowymi statków było realizowane z wykorzystaniem doświadczenia kapitanów i wiedzy dotyczącej działania steru strumieniowego oraz wiedzy dotyczącej bezwładności statku [11]. Większość nowo projektowanych i budowanych statków wyposażanych jest w stery strumieniowe. Przyczynia się to do obniżenia kosztów eksploatacji statku i poprawy bezpieczeństwa podczas manewrowania. Ruch statku podczas manewrowania przy wykorzystaniu co najmniej jednego steru strumieniowego na dziobie przedstawiono na rys. 2.1. Ster strumieniowy umożliwia głównie obracanie statku wokół osi obrotu podczas postoju lub przy bardzo małych prędkościach statku.



Rys. 2.1. Ruch statku podczas manewrowania przy wykorzystaniu co najmniej jednego steru strumieniowego na dziobie, gdzie: x, y – współrzędne pozycji statku, V – wektor prędkości wypadkowej, u – składowa wzdłużna wektora prędkości, v – składowa poprzeczna wektora prędkości, r – prędkość kątową zwrotu statku, ψ – kurs statku

Najczęściej stosuje się jeden, dwa lub trzy stery strumieniowe (ang. thruster) w części dziobowej statku (ang. bow thruster), rzadziej dodatkowy ster strumieniowy w części rufowej statku (ang. stern thruster). Działanie sterów strumieniowych polega na nadaniu siły naporu prostopadle do płaszczyzny symetrii jednostki poniżej linii wodnej. Zastosowanie sterów strumieniowych znacznie zwiększa manewrowość jednostki przy małych prędkościach oraz pozwala manewrować jednostką nieruchomą. Stery strumieniowe załączane są podczas wchodzenia do portu, pływania po kanałach, manewrowania oraz cumowania [6, 11, 64]. Na rys. 2.2 przedstawiono trzy dziobowe stery strumieniowe zastosowane na statku oceanograficznym, służące do dynamicznego pozycjonowania jednostki.



Rys. 2.2. Trzy dziobowe stery strumieniowe na statku oceanograficznym, zaprojektowane do utrzymywania stałej pozycji¹

Stery strumieniowe są największymi odbiornikami energii jakie stosuje się na statkach. Najczęściej napędzane są silnikami asynchronicznymi, rzadziej spotyka się silniki synchroniczne oraz wysokoprężny silnik spalinowy. Z uwagi na to, że moc silników podczas rozruchu osiąga wartości bliskie mocy elektrowni statku, występują problemy z utrzymaniem parametrów sieci okrętowej. W procesie projektowania systemu energetycznego statku należy uwzględnić pobór prądu podczas pracy, a także podczas rozruchu steru strumieniowego.

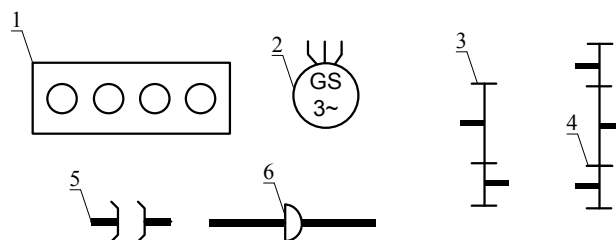
Silnik indukcyjny podczas rozruchu pobiera prąd około pięciokrotnie większy od prądu znamionowego. A zatem ster strumieniowy z napędem elektrycznym może powodować zakłócenia w pracy elektrowni statku, a w skrajnych przypadkach może doprowadzić do tzw. Blackout'u, czyli wyłączenia awaryjnego.

3. ANALIZA STRUKTUR STERÓW STRUMIENIOWYCH I STOSOWANYCH ELEMENTÓW SKŁADOWYCH

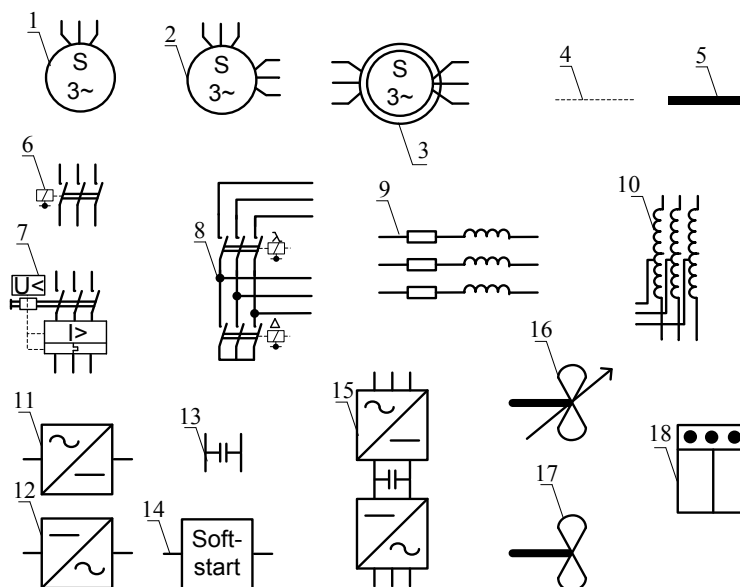
3.1 Wprowadzenie

Stery strumieniowe są to urządzenia złożone, w których możemy wyróżnić szereg elementów składowych (np. silnik, wał, śruba). Elementy te są wzajemnie powiązane i oddziałują na siebie. Spis oznaczeń graficznych wybranych elementów mogących wchodzić w skład struktur podsystemu wytwarzania energii przedstawiono na rys. 3.1. Natomiast na rys. 3.2 przedstawiono oznaczenia graficzne wybranych elementów mogących wchodzić w skład struktur sterów strumieniowych.

¹ Zdjęcie zaczerpnięte ze strony internetowej www.marine-marchande.net



Rys. 3.1. Elementy składowe rozpatrywanych podsystemów wytwarzania energii na statku:
 1 – średnioobrotowy silnik spalinowy, 2 – generator synchroniczny, 3 – przekładnia redukująca prędkość kątową, 4 – przekładnia rozdzielająca/sumująca momenty obrotowe,
 5 – sprzęgło cierne, 6 – sprzęgło podatne



Rys. 3.2. Elementy składowe rozpatrywanych podsystemów sterów strumieniowych: 1 – silnik asynchroniczny dużej mocy, 2 – silnik asynchroniczny dużej mocy, przystosowany do pracy w układzie gwiazda-trójkąt, 3 – silnik dwubiegowy, 4 – przesyłanie sygnałów sterujących, 5 – wał śrubowy lub napędowy, 6 – stycznik, 7 – stycznik z zabezpieczeniem magnetyczno-termicznym, 8 – przełącznik gwiazda-trójkąt, 9 – linia energetyczna, 10 – autotransformator, 11 – prostownik (PN-92-E/01200/6), 12 – falownik (PN-92-E/01200/6), 13 – układ pośredniczący, 14 – układ łagodnego rozruchu (softstart), 15 – przemiennik częstotliwości, 16 – śruba o skoku nastawnym, 17 – śruba o skoku stałym, 18 – szafa sterownicza

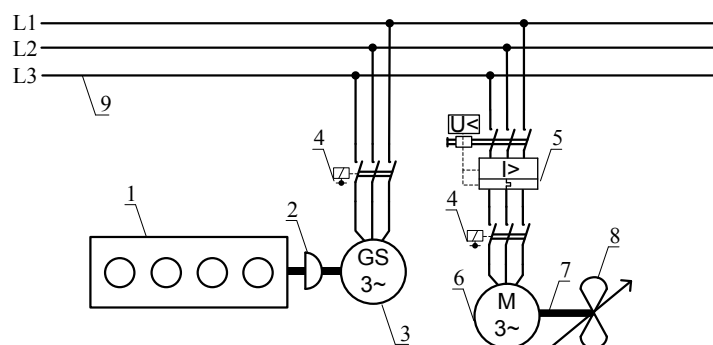
Stery strumieniowe możemy podzielić ze względu na:

- rodzaj pędników (azymutalne, tunelowe),
- rodzaj napędu (silnik indukcyjny, silnik synchroniczny, silnik wielobiegowy),
- sposoby rozruchu (bezpośredni, gwiazda-trójkąt, autotransformator, falownik, softstart),
- stosowane śruby (o skoku stałym, o skoku nastawnym),
- rodzaj zasilania (jeden generator napędzany jednym wysokoprężnym silnikiem spalinowym, dwa generatory, każdy napędzany wysokoprężnym silnikiem spalinowym itp.).

Obecnie na statkach najczęściej stosowane są stery strumieniowe tunelowe z napędem asynchronicznym. W związku z tym w dalszych rozważaniach pominięto pozostałe typy sterów strumieniowych.

3.2 Przykładowa struktura steru strumieniowego – struktura z rozruchem bezpośrednim

W skład najprostszej i zarazem najtańszej struktury steru strumieniowego z rozruchem bezpośrednim (rys. 3.3) wchodzi następujące elementy: wysokoprężny silnik spalinowy, sprzęgło podatne, generator synchroniczny, stycznik jeden po stronie generatora oraz drugi po stronie silnika, stycznik z zabezpieczeniem magnetyczno-termicznym, silnik indukcyjny, wał śrubowy, śruba o skoku nastawnym, układ sterujący (nieujęty na rysunku), rezystor grzewczy (nieujęty na rysunku), sieć elektroenergetyczna statku.



Rys. 3.3. Struktura steru strumieniowego z rozruchem bezpośrednim, gdzie: 1 – wysokoprężny silnik spalinowy, 2 – sprzęgło podatne, 3 – generator synchroniczny, 4 – stycznik, 5 – stycznik z zabezpieczeniem magnetyczno-termicznym, 6 – silnik indukcyjny, 7 – wał śrubowy, 8 – śruba o zmiennym skoku, 9 – sieć elektroenergetyczna statku

Podczas rozruchu śrubę ustawia się w pozycji biegu jałowego. Moment oporu stawianego przez śrubę wynosi wówczas ok. 15–20% wartości nominalnej. W trakcie rozruchu bezpośredniego silnika indukcyjnego występują znaczne prądy rozruchowe, przekraczające 4,5–6,5 razy prąd nominalny. Moc elektrowni statku musi kilkakrotnie (co najmniej 4 razy) przekraczać moc załączanego silnika, aby uniknąć wyłączenia awaryjnego. Znaczny skokowy wzrost pobieranego prądu podczas rozruchu wprowadza duże zakłócenie w sieci elektroenergetycznej statku. Dodatkowo wszystkie stany pracy są obwarowane odpowiednimi przepisami towarzystwa klasyfikacyjnego [2, 74, 77, 80], które muszą być bezwarunkowo spełnione, aby statek został dopuszczony do eksploatacji [5, 11, 41, 64].

3.3 Podsumowanie

Istnieje wiele rozwiązań technicznych stosowanych obecnie sterów strumieniowych. Jednak z przyczyn ekonomicznych (poszukiwania urządzeń o możliwie prostej budowie oraz niskich kosztach eksploatacji), najczęściej stosuje się stery strumieniowe ze śrubą nastawną oraz napędem elektrycznym (silnikiem indukcyjnym). W rozprawie przedstawiono i omówiono najczęściej spotykane struktury napędów oraz sposoby sterowania rozruchem stosowanych napędów. W pracy wyróżniono i mówiono struktury sterów strumieniowych takie jak:

- struktura steru strumieniowego z rozruchem bezpośrednim,
- struktura steru strumieniowego z rozruchem gwiazda-trójkąt,
- struktura steru strumieniowego z rozruchem autotransformatorowym,
- struktura steru strumieniowego z łagodnym rozruchem (softstart),
- struktura steru strumieniowego z regulacją obrotów poprzez silnik wielobiegowy,
- struktura steru strumieniowego z rozruchem oraz regulacją obrotów poprzez przemiennik częstotliwości,
- struktura steru strumieniowego z rozruchem bezpośrednim oraz przekładnią,

- struktura steru strumieniowego z rozruchem bezpośrednim oraz dwoma wysokoprężnymi silnikami spalinowymi i jednym generatorem,
- ster strumieniowy z dwoma wysokoprężnymi silnikami spalinowymi i dwoma generatorami.

4. BIBLIOTEKA MODELI MATEMATYCZNYCH ELEMENTÓW SKŁADOWYCH STERÓW STRUMIENIOWYCH

4.1 Wprowadzenie

Rozpatrywane w poprzednim rozdziale elementy, mogące wchodzić w skład struktur sterów strumieniowych, są produkowane oraz dostarczane wyłącznie na zamówienie wyspecjalizowanych stoczn budujących oraz remontujących statki. Z uwagi na wysokie koszty ich produkcji, duże gabaryty oraz małe serie produkcyjne, zdecydowano się na rezygnację z badania rzeczywistych elementów, a także modeli fizycznych. W związku z tym, jako źródło wiedzy o procesach zachodzących podczas rozruchu oraz pracy w/w urządzeń, wykorzystane zostaną modele matematyczne.

W pracy zamieszczono i wykorzystano wybrane modele matematyczne elementów mogących wchodzić w skład w/w struktur, takie jak:

- uproszczone modele matematyczne (hybrydowy model wysokoprężnego silnika spalinowego, nieliniowy model regulatora prędkości kątowej silnika spalinowego, model generatora synchronicznego, model tyrystorowego układu wzbudzenia i regulatora napięcia generatora synchronicznego, model silnika indukcyjnego, model silnika indukcyjnego uwzględniający straty w żelazie, model silnika indukcyjnego uwzględniający straty w miedzi, hybrydowy model silnika indukcyjnego, model przekładni, model przekładni sumującej momenty obrotowe dwóch źródeł energii mechanicznej, liniowy model wału śrubowego, model śruby o stałym lub zmiennym skoku, model śruby o zmiennym skoku tunelu, model obciążenia sieci),
- modele matematyczne dostępne w przyborniku aplikacji Matlab/Simulink – *SimPowerSystems* (model maszyny synchronicznej, model maszyny asynchronicznej).

Ponadto w bibliotece modeli matematycznych umieszczono elementy skokowo zmieniające napięcie (przełącznik gwiazda-trójkąt, autotransformator) [41].

Na potrzeby niniejszej pracy zdecydowano się skorzystać z trzech poziomów modelowania:

- na pierwszym poziomie wykorzystane zostaną modele statyczne elementów składowych steru strumieniowego,
- drugi poziom dotyczy doboru struktur oraz elementów mogących wchodzić w ich skład przez system ekspertowy (wykorzystywane są uproszczone modele statyczne uzupełnione o dynamikę),
- trzeci poziom dotyczy bardziej dokładnych modeli całościowych struktur (zostaną one wykorzystane do weryfikacji końcowych rozwiązań proponowanych przez system ekspertowy).

Wybrane modele matematyczne zostaną wykorzystane do badania wzajemnego oddziaływania elementów podsystemu steru strumieniowego statku. Przedstawione w rozprawie modele zostały dobrane pod względem:

- wzajemnej spójności (wielkości wejściowe i wyjściowe umożliwiają badanie ich wzajemnego oddziaływania oraz łatwe łączenie pomiędzy sobą),
- podobnego stopnia odwzorowania zjawisk (modele wraz z dobranymi parametrami mają podobną adekwatność),

- podobnego stopnia uproszczenia (np. nie rozważano wpływu temperatury zewnętrznej, stanów awaryjnych itp.).

W rozprawie przedstawiono modele, które możemy podzielić na cztery grupy:

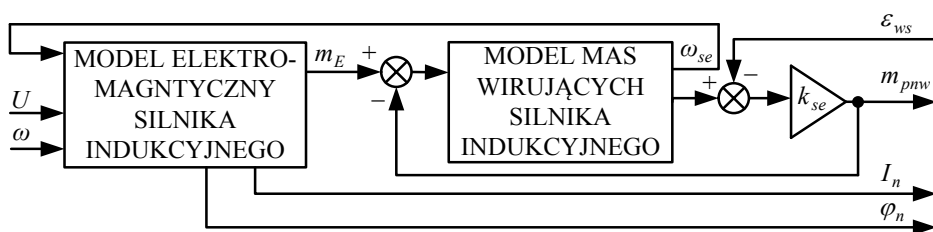
- modele opracowane przez autora z wykorzystaniem literatury [3, 5, 13, 17, 20–23, 31] (hybrydowy model silnika indukcyjnego, model śruby o zmiennym skoku tunelu),
- modele zaczerpnięte z literatury [5, 18, 19, 22, 35] (hybrydowy model wysokoprężnego silnika spalinowego, nieliniowy model regulatora prędkości kątowej silnika spalinowego, model generatora synchronicznego, model tyrystorowego układu wzbudzenia i regulatora napięcia generatora synchronicznego, model silnika indukcyjnego, model silnika indukcyjnego uwzględniający straty w żelazie, model silnika indukcyjnego uwzględniający straty w miedzi, model przekładni, model przekładni sumującej momenty obrotowe dwóch źródeł energii mechanicznej, liniowy model wału śrubowego, model śruby o stałym lub zmiennym skoku, model obciążenia sieci),
- modele zaczerpnięte z biblioteki środowiska Matlab/Simulink – *SimPowerSystems* [21, 78].

Zdecydowano się opracować modele matematyczne, w sposób umożliwiający łatwą implementację w aktualnie wykorzystywanych do badań naukowych środowiskach symulacyjnych, jak i w tych, które mogą powstać w przyszłości.

Z uwagi na wystarczające możliwości oraz dostępność, autor rozprawy do budowy biblioteki modeli matematycznych wybrał środowisko symulacyjne Matlab/Simulink [78]. Decyzja taka wynika m.in.: z dużej stabilności tego środowiska, ze zdobytego wcześniej doświadczenia w badaniach symulacyjnych z wykorzystaniem środowiska Matlab [41–44, 46, 52], z posiadania przez Politechnikę Gdańską licencji, możliwości dokonania weryfikacji części opracowanych modeli matematycznych z wykorzystaniem biblioteki *SimPowerSystems* oraz z dostępności online pomocy wraz z wieloma przykładami [78].

4.2 Model matematyczny silnika indukcyjnego uwzględniający straty w żelazie

Przegląd literaturowy [5, 17, 31, 35] dostarcza wiele modeli matematycznych silników indukcyjnych uwzględniających różne stany ich pracy oraz dobrane parametry modeli. Zapewniają one bardziej lub mniej wierne odwzorowanie charakterystyk rzeczywistych elementów. Na podstawie literatury [31, 42] opracowano model silnika indukcyjnego uwzględniający straty w żelazie. Strukturę modelu przedstawiono na rys. 4.1. Model matematyczny opisują zależności (4.1) ÷ (4.13). Opis matematyczny uzyskano w wyniku przekształcenia równań opisujących obwody silnika przedstawionego na rys. 4.2.



Rys. 4.1. Struktura modelu silnika indukcyjnego

Wejściami modelu silnika indukcyjnego są:

- U – wartość skuteczna napięcia jednej z faz zasilania,
- ω – pulsacja prądu przemiennego,

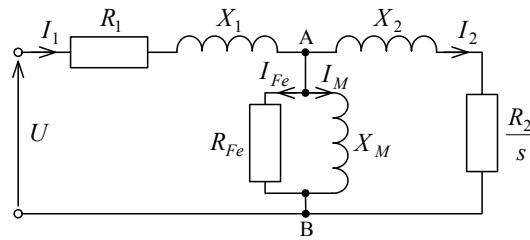
ε_{ws} – droga kątowa z wału odbiornika.

Parametrami modelu silnika indukcyjnego są:

- p_n – liczba par biegunów stojana silnika,
- R_1 – rezystancja stojana,
- R_2 – rezystancja obwodu klatki wirnika,
- R_{Fe} – rezystancja strat w żelazie,
- X_1 – reaktancja stojana,
- X_2 – reaktancja sprzężenia wirnika i obwodu klatki,
- X_M – reaktancja rozproszenia,
- k_{se} – współczynnik sprężystości skrętnej wału silnika,
- k_{te} – współczynnik wzmocnienia momentu tarcia wirnika,
- T_{se} – stała rozbiegu mas wirujących silnika indukcyjnego.

Wyjściami modelu silnika indukcyjnego są:

- m_{pnw} – moment przenoszony na wał,
- I_n – wartość skuteczna prądu obciążenia dla jednej z faz wyznaczana w modelu,
- φ_n – przesunięcie fazowe prądu obciążenia.



Rys. 4.2. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego uwzględniający straty w żelazie

Równania opisujące model silnika indukcyjnego uwzględniającego straty w żelazie:

$$Z_1 = R_1 + jX_1, \quad (4.1)$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2, \quad (4.2)$$

$$Z_0 = \frac{R_{Fe} \cdot jX_M}{R_{Fe} + jX_M}, \quad (4.3)$$

gdzie: Z_1 – impedancja zespolona obwodów stojana, Z_2 – impedancja zespolona obwodów wirnika, Z_0 – impedancja zespolona uwzględniająca straty w żelazie, s – poślizg wirnika.

Impedancję zespoloną zastępczą Z_{AB} połączenia równoległego impedancji Z_0 i impedancji Z_2 wyraża równanie:

$$Z_{AB} = \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}. \quad (4.4)$$

Impedancję zespoloną zastępczą Z_Z wyraża równanie:

$$Z_Z = Z_1 + Z_{AB}. \quad (4.5)$$

Wartość skuteczną zespoloną prądu silnika I_1 wyraża równanie:

$$I_1 = \frac{U}{Z_Z}. \quad (4.6)$$

Wartość skuteczną I_n oraz przesunięcie fazowe φ_n prądu obciążenia wyznaczamy z zależności:

$$I_n = |I_1|, \quad (4.7)$$

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{\text{Im}(I_1)}{\text{Re}(I_1)}\right). \quad (4.8)$$

Wartość skuteczną zespoloną prądu klatki wirnika I_2 wyznaczamy z zależności:

$$U_1 = I_1 Z_1, \quad (4.9)$$

$$U_{AB} = U - U_1, \quad (4.10)$$

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{Z_2}. \quad (4.11)$$

Moment obrotowy m_E generowany przez silnik indukcyjny możemy wyrazić zależnością:

$$m_E = \frac{R_2}{s} I_2^2. \quad (4.12)$$

Poślizg wirnika s wyznaczamy ze wzoru:

$$s = 1 - p_n \frac{\omega_{se}}{\omega}, \quad (4.13)$$

gdzie: ω_{se} – prędkość kątowna wirnika silnika.

Poniżej przedstawiono liniowy opis części mechanicznej silnika indukcyjnego. Wartość przenoszonego momentu obrotowego przez wał silnika określa równanie:

$$m_{pnw} = k_{se} (\varepsilon_{se} - \varepsilon_{ws}), \quad (4.14)$$

gdzie: ε_{se} – droga kątowna wału wirnika.

Drogę kątową wału silnika ε_{se} można wyrazić następująco:

$$\varepsilon_{se} = \int_0^t \omega_{se}(t) dt, \quad (4.15)$$

gdzie: ω_{se} – prędkość kątowna wirnika silnika.

Dynamikę mas wirujących silnika indukcyjnego opisują zależności:

$$T_{se} \frac{d\omega_{se}}{dt} = m_E - m_{te} - m_{pnw}, \quad (4.16)$$

$$m_{te} = k_{te} \omega_{se}, \quad (4.17)$$

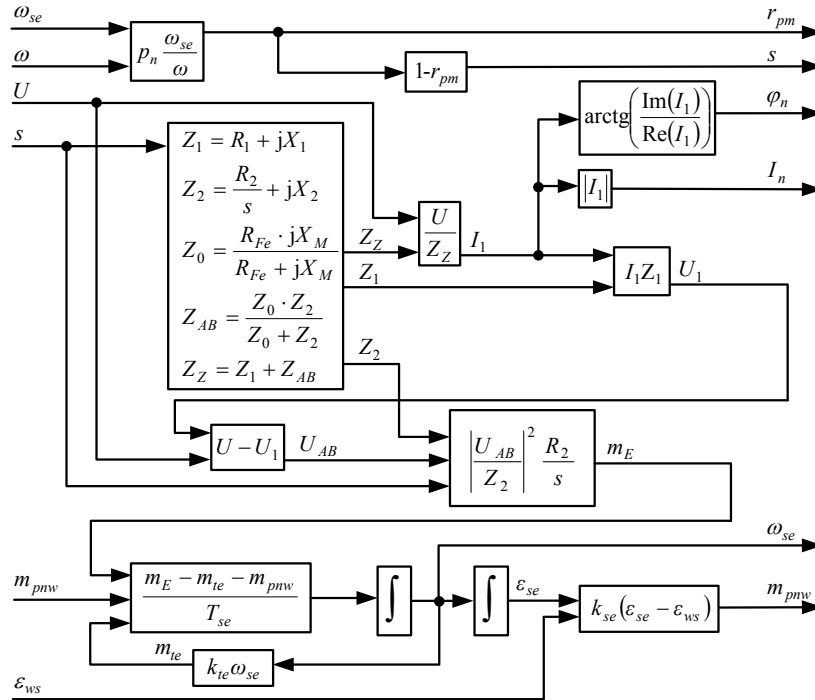
gdzie: m_{te} – moment tarcia wirnika silnika.

4.3 Redakcja modelu matematycznego silnika indukcyjnego uwzględniającego straty w żelazie

Na podstawie równań (4.1) ÷ (4.17) zredukowano model matematyczny silnika indukcyjnego uwzględniający straty w żelazie. Równanie opisujące dynamikę mas wirujących (4.16) przekształcono do postaci (4.18).

$$\omega_{se} = \frac{1}{T_{se}} \int_0^t (m_E - m_{te} - m_{pnw}) dt. \quad (4.18)$$

Strukturę modelu silnika indukcyjnego przedstawiono na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Struktura modelu matematycznego silnika indukcyjnego uwzględniającego straty w żelazie

4.4 Podsumowanie

Podjęcie problematyki modelowania systemów energetycznych statków obliuguje do uwzględnienia stosowanych elementów składowych, układów regulacji i sterowania oraz uwzględnienia możliwych konfiguracji systemów. Pożądana jest możliwość tworzenia powiązań „dowolnych” modeli elementów składowych i ocena ich funkcjonowania w systemach z wykorzystaniem badań symulacyjnych.

W rozprawie zebrano oraz dokonano redakcji modeli matematycznych takich urządzeń jak:

- wysokoprężny silnik spalinowy,
- regulator prędkości kątowej silnika spalinowego,
- generator synchroniczny,
- tyrystorowy układ wzbudzenia oraz regulator napięcia generatora synchronicznego,
- silnik indukcyjny,
- silnik indukcyjny z uwzględnieniem strat w żelazie,
- silnik indukcyjny z uwzględnieniem strat w miedzi,
- hybrydowy silnik indukcyjny,
- przekładnia prędkości,

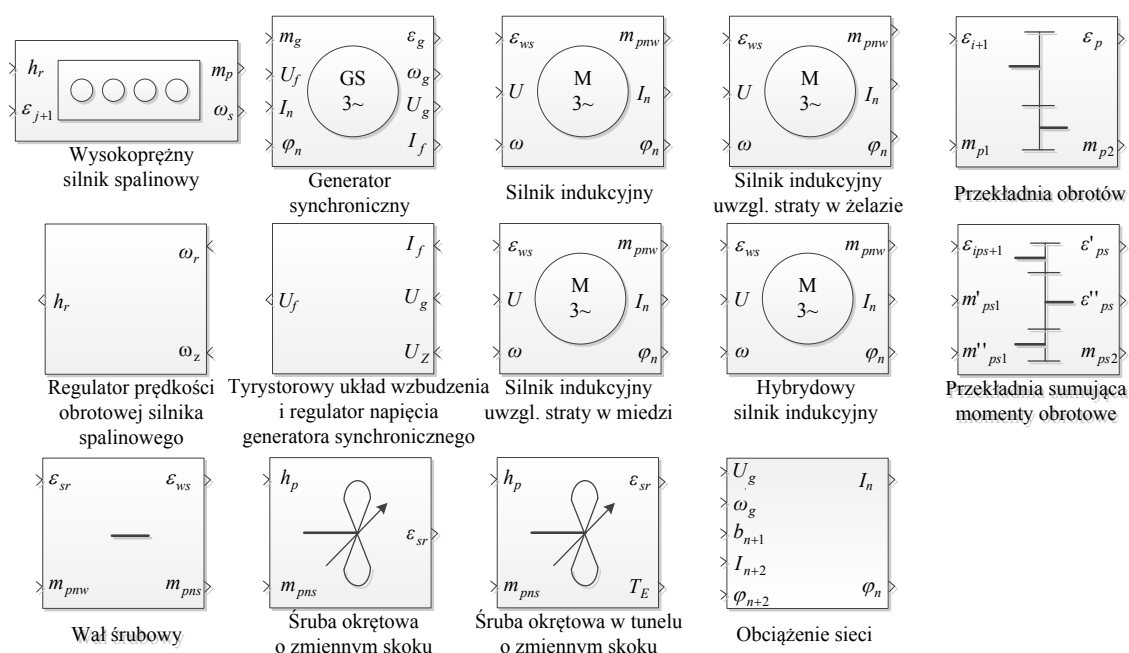
- przekładnia sumująca momenty obrotowe dwóch źródeł energii mechanicznej,
- wał śrubowy,
- śruba o zmiennym skoku,
- śruba o zmiennym skoku w tunelu,
- obciążenie sieci,
- oraz przedstawiono wybrane modele zaczerpnięte z biblioteki Matlaba *SimPowerSystems*, takie jak:
- maszyna synchroniczna,
- maszyna asynchroniczna.

Istotą zebranych i przedstawionych modeli matematycznych jest ich podobny stopień uproszczenia oraz topologia umożliwiające ich wzajemne łączenie w całościowe struktury symulacyjne. Podobny stopień uproszczenia jest niezbędny, aby modele połączone w struktury dawały adekwatne wyniki symulacji, natomiast wejścia oraz wyjścia modeli zostały przygotowane w sposób umożliwiający ich bezpośrednie łączenie.

Wykorzystanie gotowych modeli z aplikacji Matlab (biblioteka *SimPowerSystems* i inne) jest możliwe tylko w ograniczonym zakresie, ponieważ:

- biblioteki Matlaba nie zawierają wszystkich modeli elementów wykorzystywanych w niniejszej rozprawie (np. modelu wysokoprężnego silnika spalinowego),
- wykorzystanie gotowych modeli z bibliotek Matlaba ogranicza możliwości przenoszenia aplikacji systemu ekspertowego na inne platformy symulacyjne (np. Xcos, Scicos) [81],
- licencje Matlaba uniemożliwiają rozpowszechnianie modeli całych podsystemów w celu ich weryfikacji, modyfikacji oraz ulepszania przez innych użytkowników bez ponoszenia dodatkowych opłat.

W związku z tym zdecydowano się zbudować własną, otwartą bibliotekę modeli matematycznych (rys. 4.4). Biblioteka ta będzie w przyszłości rozwijana o kolejne modele matematyczne.



Rys. 4.4. Biblioteka modeli matematycznych elementów składowych podsystemu steru strumieniowego

5. DOBÓR PARAMETRÓW I WERYFIKACJA MODELI ELEMENTÓW SKŁADOWYCH

5.1 Wprowadzenie

Dobór parametrów modeli matematycznych jest procesem optymalizacji. Celem optymalizacji jest taki dobór parametrów modeli matematycznych, aby osiągnąć wyniki symulacji zbliżone do wyników (charakterystyk) uzyskanych podczas testów rzeczywistych elementów. W przypadku klasycznych modeli matematycznych większość parametrów można obliczyć/oszacować. Autor rozprawy uważa, że dla badanych hybrydowych modeli matematycznych, do doboru parametrów lepiej wykorzystać metody optymalizacyjne. W procesach optymalizacyjnych wykorzystujemy różne metody opisane szerzej w literaturze [1, 4, 12, 25, 30, 75].

Założeniem rozprawy jest budowa aplikacji systemu ekspertowego opartego na badaniach symulacyjnych (on-line) struktur sterów strumieniowych. Elementami struktur sterów strumieniowych są podzespoły (np. silnik indukcyjny, generator synchroniczny) opisane w postaci modeli matematycznych. Jednak modele bez odpowiednich parametrów, niezwerifikowane, są nieprzydatne do badań symulacyjnych. A zatem istnieje potrzeba dokonania doboru parametrów niektórych modeli matematycznych opisanych we wcześniejszych rozdziałach. Z uwagi na potrzebę optymalizacji parametrów modeli klasycznych, jak i hybrydowych, zdecydowano się wykorzystać w niniejszej pracy metodę algorytmów genetycznych.

W latach siedemdziesiątych opracowano metody ewolucyjne początkowo dzielone na algorytmy genetyczne, programowanie ewolucyjne oraz strategie ewolucyjne. Obecnie nazywane są one ogólnie algorytmami ewolucyjnymi [12]. Algorytmy ewolucyjne powstały w wyniku próby naśladowania naturalnych procesów opisanych teorią ewolucji. Procesy te ujęto w postaci procedur matematycznych. Aplikacje komputerowe wzorując się na naturalnych procesach, są w stanie rozwiązywać problemy optymalizacyjne o różnym stopniu skomplikowania.

Parametry modelu ogólnego dobierane są tak, aby zapewniały optimum dla kryterium bliskości charakterystyk modelu względem charakterystyk wzorca. Jest to metoda często wykraczająca poza wymagane minimalne możliwości pozyskiwania informacji o parametrach modeli. Zdecydowano się na nią, ponieważ autor rozprawy posiada doświadczenie w badaniach dotyczących doboru parametrów silników indukcyjnych oraz wykorzystaniu algorytmów genetycznych [42, 45]. Również światowa literatura dostarcza przykładów wykorzystania podobnych metod doboru parametrów [36, 47].

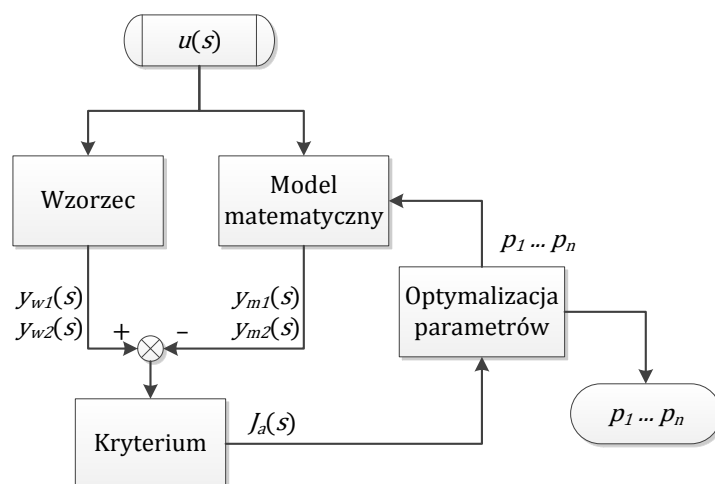
5.2 Zdefiniowanie problemu optymalizacji parametrów

Założono, że wskaźniki oceny jakości dobranych parametrów będą obliczane na podstawie porównania uzyskanych w wyniku symulacji charakterystyk z charakterystykami rzeczywistych elementów, które mogą wchodzić w skład struktur sterów strumieniowych.

Wybrany algorytm optymalizacji parametrów modeli matematycznych przedstawiono na rys. 5.1. Podczas symulacji odpowiedź modelu na sygnał wymuszający $u(s)$ zostaje zapisana w postaci macierzy punktów charakterystyk modelowanych $y_{m1}(s)$, $y_{m2}(s)$. Na podstawie danych producenta utworzona zostaje macierz punktów charakterystyk wzorcowych $y_{w1}(s)$, $y_{w2}(s)$. Następnie macierze te są porównywane i oceniane przy pomocy wybranego kryterium. Na podstawie obliczonej $J_a(s)$ jakości modelu, algorytm optymalizacyjny dobiera kolejne (zwykle lepsze) parametry modelu. Zbiór najlepszych parametrów $p_1 - p_n$ jest zapisywany w pliku tekstowym.

Opracowano również algorytm weryfikacji modeli matematycznych na potrzeby badań symulacyjnych.

Pierwszym etapem jest przygotowanie charakterystyk wzorcowych. Następnie z biblioteki modeli matematycznych wybierany jest model matematyczny, a jego opisy matematyczne są wprowadzane do aplikacji symulacyjnej wraz z parametrami. Uzyskane wyniki symulacji są oceniane z wykorzystaniem kryterium jakości. Jeżeli model spełnia założenia, wyniki zapisywane są do biblioteki modeli. Następnie badany jest kolejny model matematyczny. Na koniec aplikacja informuje użytkownika o modelach spełniających założenia lub o ich braku.



Rys. 5.1. Struktura modelu procesu doboru parametrów modeli matematycznych

5.3 Charakterystyki wzorcowe

Aplikacja dobierająca parametry modeli oblicza wartość funkcji celu, porównując charakterystyki wzorcowe z modelowanymi. Zebrano szereg kart katalogowych zawierających dane oraz charakterystyki rzeczywistych elementów [67–71, 82]. Z każdej charakterystyki wzorcowej odczytano punkty na potrzeby aplikacji dobierającej parametry modeli matematycznych..

5.4 Miary odległości charakterystyki modelowanej i wzorcowej

Parametry modelu dobierane są tak, aby zapewniały optimum zdefiniowanego kryterium bliskości charakterystyk modelu względem charakterystyk wzorca. Jako miary odległości charakterystyk definiuje się miary oparte na ciągłych oraz dyskretnych pomiarach przebiegów sygnałów [5]. Z uwagi na wykorzystanie charakterystyk wzorcowych, z których punkt po punkcie odczytywano wartości, wykorzystano miary dyskretne. Pozwalają one na ocenę czy badany model matematyczny odpowiada wzorcowi. Spośród dostępnych wybrano cztery miary opisane równaniami (5.1) ÷ (5.4):

— suma kwadratów

$$J_a(p) = \sum_{i=1}^k [y_m^i(t) - y_w^i(t)]^2, \quad (5.1)$$

— suma wartości bezwzględnych

$$J_a(p) = \sum_{i=1}^k |y_m^i(t) - y_w^i(t)|, \quad (5.2)$$

— maksymalną odległość punktów

$$J_a(p) = \sum_{i=1}^k \max |y_m^i(t) - y_w^i(t)|, \quad (5.3)$$

— względną maksymalną odległość punktów

$$J_a(p) = \sum_{i=1}^k \max \left| \frac{y_m^i(t) - y_w^i(t)}{y_w^i(t)} \right|, \quad (5.4)$$

gdzie: $y_m^i(t)$ – wartości odpowiedzi modelu na przyjęte pobudzenie w chwili i , $y_w^i(t)$ – wartości odpowiedzi wzorca na przyjęte pobudzenie w chwili i , $i \leq k \in N$, k – liczba pomiarów, N – zbiór liczb naturalnych.

Każdą z miar opisanych równaniami (5.1) ÷ (5.4) przebadano eksperymentalnie i stwierdzono, że najbardziej adekwatne rozwiązania dla zadanego problemu uzyskiwane są przy zastosowaniu miary w postaci sumy kwadratów [45]. Z tego powodu w pracy wykorzystano dyskretną miarę sumy kwadratów.

5.5 Algorytm genetyczny

W celu estymacji parametrów silników indukcyjnych skorzystano z algorytmu genetycznego zaimplementowanego w środowisku Matlab – GEATbx czyli *Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox* [65]. Algorytm doboru parametrów modelu matematycznego przez algorytm genetyczny przedstawiono na rys. 5.2. Na początku pobierane są punkty odczytane z charakterystyk wzorcowych. Następnie z ograniczonego zakresu losowana jest populacja początkowa (parametry p modelu). Porównując charakterystyki wzorcową z modelowaną i przy wykorzystaniu jednej z miar oceny odległości charakterystyki modelowanej od wzorcowej, obliczana jest wartość funkcji celu. Następnie wybierane są najlepsze osobniki, po czym algorytm genetyczny, wykorzystując funkcje krzyżowania oraz mutacji generuje nową populację. Jest to powtarzane, aż zostanie osiągnięty parametr gen_{max} ograniczający liczbę generacji. Zwiększenie generacji powyżej gen_{max} nie powinno powodować poprawy rozwiązań w dostrzegalny sposób przy zadanym problemie doboru parametrów. Na końcu generowana jest macierz najlepszych rozwiązań i następuje zakończenie działania algorytmu.

Najlepsze rozwiązania są zbiorem parametrów p , opisanym zależnościami (5.5) ÷ (5.8), określonym jako:

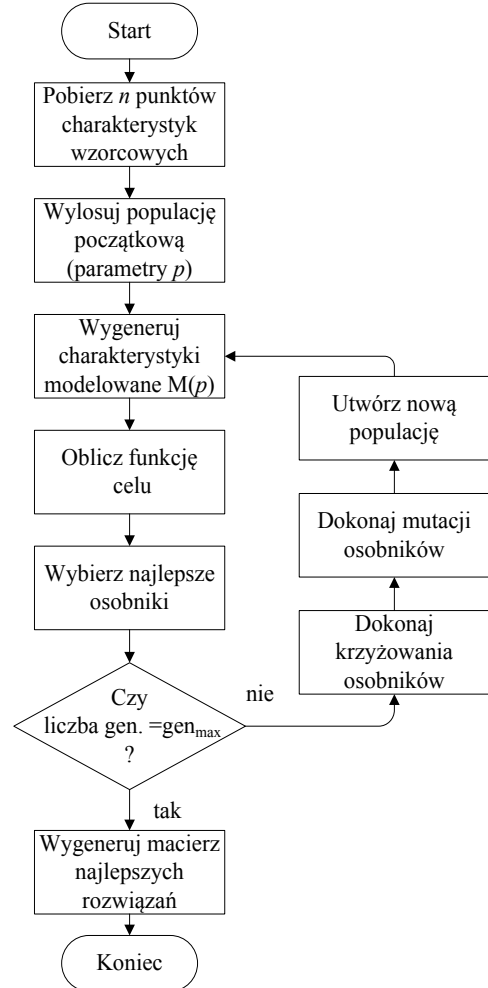
$$p \in P \subseteq R_+, \quad (5.5)$$

$$p_i \in \langle 0; p_{max} \rangle, \quad (5.6)$$

$$i \in N, \quad (5.7)$$

$$i \in \langle 1; n_p \rangle, \quad (5.8)$$

gdzie: P – zbiór ograniczeń parametrów, p_i – współrzędna wektora P , i – kolejny parametr, p_{max} – maksymalna wartość pojedynczego parametru, n_p – liczba parametrów, R_+ – zbiór liczb rzeczywistych dodatnich, N – zbiór liczb naturalnych.



Rys. 5.2. Algorytm doboru parametrów modelu matematycznego przez algorytm genetyczny

5.6 Obliczanie procentowej adekwatności modelu

Obliczona odległość charakterystyki modelowanej i wzorcowej na podstawie równania (5.1) umożliwia algorytmowi genetycznemu ocenę modelu. Stosowane są różne miary odległości charakterystyk modelowanych od wzorcowych, a także opcjonalne wykorzystywane wskaźniki wagowe. Utrudnia to porównywanie jakości poszczególnych modeli. Dlatego w celu przedstawienia użytkownikowi adekwatności modeli, obliczana jest procentowa miara adekwatności na podstawie równania (5.9):

$$J_{\%}(p) = \frac{\sum_{i=1}^k \left| \frac{y_m^i(t) - y_w^i(t)}{y_w^i(t)} \right|}{n} \cdot 100 \%, \quad (5.9)$$

gdzie: n – liczba odczytanych punktów charakterystyki wzorcowej.

Procentową miarę adekwatności ocenia się pod względem spełnienia zależności (5.10):

$$J_{\%}(p) < D_{\%}^*, \quad (5.10)$$

gdzie: $D_{\%}^*$ – procentowa minimalna wymagana adekwatność modelu.

Przyjęto założenie, że procentowa minimalna adekwatność modelu $D_{\%}^*$ odpowiada adekwatności modelu z parametrami wyznaczonymi na podstawie obliczeń oraz oszacowania. Jeżeli wyniki nie potwierdzają wystarczającej adekwatności modelu w stosunku do odpowiadającego rzeczywistego elementu, stosuje się weryfikację, a jeżeli i ona nie przynosi oczekiwanego rezultatu, to model uznaje się za nieprzydatny.

5.7 Dobór parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego

Jako przykład w rozprawie przedstawiono dobór parametrów modelu matematycznego opisanego równaniami (4.1) ÷ (4.13) dla silnika indukcyjnego firmy ABB Zamech Marine sp. z o.o. typu AMA400L6D VAMH o mocy 800 kW [69]. Model wraz z dobranymi parametrami oceniano pod kątem dokładności odwzorowywania charakterystyk wzorcowych prądu I/I_n oraz momentu T/T_n w funkcji poślizgu s . W ten sposób zbadano przydatność modelu matematycznego do opisu pracy rzeczywistego silnika indukcyjnego.

Przyjęty model matematyczny silnika indukcyjnego uwzględniający straty w żelazie, zapisano w postaci m-pliku. Aplikacja doboru parametrów działa zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 5.2. Rozpoczyna pracę od wygenerowania populacji początkowej, która jest losowana z zadeklarowanych przedziałów. Przedziały oszacowano na podstawie literatury [13]. Przyjęto, że populacją są poszukiwane parametry: R_1 – rezystancja stojana, R_2 – rezystancja obwodu klatki, R_{Fe} – rezystancja strat w żelazie, X_1 – reaktancja stojana, X_2 – reaktancja sprzężenia wirnika i obwodu klatki, X_M – reaktancja rozproszenia. Nie uwzględniono zmian parametrów podczas rozruchu.

Algorytm genetyczny oblicza funkcję celu (przystosowania) na podstawie wybranego kryterium. Jako kryterium jakości wybrano sumę kwadratów różnic pomiędzy odpowiedziami modelu i wzorca w funkcji poślizgu. Opisuje je zależność ogólna (5.1). Parametry modelu dobierane są tak, aby charakterystyki modelowane były jak najbardziej „bliskie” charakterystykom wzorcowym.

Model matematyczny zweryfikowano obliczając procentową adekwatność na podstawie równania (5.11), które opracowano uwzględniając zależności (5.9) i (5.10).

$$J_{\%}(p) = \frac{\sum_{i=1}^k \left(|Te_m^i(s) - Te_w^i(s)| + |I_m^i(s) - I_w^i(s)| \right)}{m \cdot n} \cdot 100\%, \quad (5.11)$$

gdzie: m – liczba charakterystyk, n – liczba odczytanych punktów charakterystyki wzorcowej.

5.8 Podsumowanie

Spośród dostępnych metod doboru parametrów modeli matematycznych wybrano algorytmy ewolucyjne (algorytm genetyczny). Wydaje się on być dobrą metodą (szybką i skuteczną), zarówno dla modeli klasycznych, jak i hybrydowych. Po przeprowadzeniu wielu prób, okazało się, że największą adekwatność wykazują modele hybrydowe z uwzględnieniem nasycenia. Model taki może być dostrajany dla dowolnego typu silnika klatkowego.

6. APLIKACJA SYSTEMU EKSPERTOWEGO WSPOMAGAJĄCEGO PROJEKTOWANIE UKŁADÓW STERÓW STRUMIENIOWYCH

6.1 Wprowadzenie

Współczesne wspomagane komputerowo projektowanie najczęściej ogranicza się do modelowania pojedynczych podzespołów oraz badania zachowania wytrzymałości konstrukcji w zewnętrznym środowisku itp. Istnieje nadal wiele dziedzin, w których człowiek jest lepszy od komputera. Zastosowanie sztucznej inteligencji ma na celu podjęcie próby zastąpienia na pewnych obszarach człowieka przez maszynę [27].

Systemy ekspertowe znajdują głównie zastosowanie w ograniczonych obszarach, dla których rozwiązanie problemu jest możliwe przy pomocy wiedzy eksperta. Wiedza eksperta powinna być formalizowana w postaci opisów symbolicznych. Systemy ekspertowe zwykle stosujemy, gdy rozwiązanie problemu konwencjonalnymi metodami jest niemożliwe lub ekonomicznie nieuzasadnione. Systemy ekspertowe znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle: w monitorowaniu procesów, projektowaniu, diagnostyce, planowaniu, konsultacjach i szkoleniach.

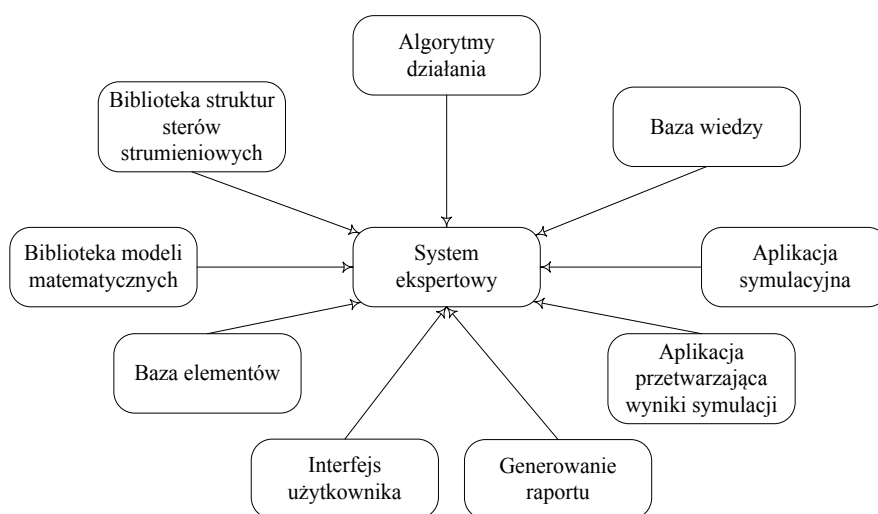
Klasyczne systemy ekspertowe składają się z kilku podstawowych elementów: bazy wiedzy, mechanizmów wnioskowania, elementów wyjaśniających, interfejsu użytkownika, elementów wspomagających pozyskiwanie wiedzy. Ponadto buduje się również hybrydowe systemy ekspertowe, które posiadają dodatkowe komponenty wspomagające podejmowanie decyzji.

Baza wiedzy zawiera informacje sformalizowane w postaci danych, zasad postępowania, procedur umożliwiających rozwiązanie problemu. Przy jej budowaniu niezbędne jest bezpośrednie korzystanie z wiedzy eksperta (np. projektanta). Mechanizmy wnioskowania zawierają tor logiczny, który na podstawie danych oraz informacji zawartych w bazie wiedzy umożliwia uzyskanie rozwiązań problemu. Elementy wyjaśniające wspomagają zrozumienie problemu oraz proponowanych rozwiązań przez użytkowników o różnym stopniu zaawansowania wiedzy. Interfejs użytkownika umożliwia interakcję użytkownika z systemem ekspertowym. Wspomaga zadawanie pytań i zrozumienie odpowiedzi. Wskazane jest również wykorzystanie elementów graficznych.

Wiedza eksperta jest heurystyczna, intuicyjna, przez co trudno formalizowana w postaci reguł i opisów matematycznych. Budowa bazy wiedzy to proces czasochłonny i trudny. A sam proces budowy systemu ekspertowego zmierza w kierunku przybliżania się i powielania sposobów zachowania, takich jak zachowanie eksperta. Pewnych elementów projektowania prawdopodobnie nigdy nie zastąpi maszyna, jednak zastosowanie sztucznej inteligencji obniża nakład pracy ludzkiej i przyczynia się do eliminacji wykonywania żmudnych, powtarzalnych czynności.

6.2 Organizacja hybrydowego systemu ekspertowego wspomagającego dobór elementów i badanie układów sterów strumieniowych

Opracowany został hybrydowy system ekspertowy wspomagający dobór oraz analizę podsystemu steru strumieniowego statku. Strukturę aplikacji wykorzystującej system z bazą wiedzy oraz program symulacyjny do wspomagania projektowania podsystemów energetycznych statków przedstawiono na rys. 6.1. Jej elementy to: biblioteka zawierająca stosowane struktury sterów strumieniowych, baza elementów mogących wchodzić w skład tych struktur, biblioteka modeli matematycznych opisujących elementy z bazy, algorytmy wnioskujące i decyzyjne, baza wiedzy dotycząca doboru elementów struktur oraz przepisów towarzystw klasyfikacyjnych, aplikacja umożliwiająca badania symulacyjne zestawionych modeli w struktury, aplikacja oceniająca wyniki symulacji, generator raportu oraz przyjazny dla użytkownika interfejs.



Rys. 6.1. Struktura aplikacji wykorzystującej system z bazą wiedzy oraz program symulacyjny do wspomagania projektowania podsystemów energetycznych statków

Z uwagi na prototypowy charakter realizowanego systemu z bazą wiedzy do wspomagania doboru elementów układów sterów strumieniowych statków oraz ich analizy, zastosowano szkieletowy system ekspertowy Exsys Developer V.7.0 [66]. Stworzono także podsystem badań symulacyjnych współpracujący z systemem ekspertowym. Wykorzystano w tym celu aplikację Matlab/Simulink. Opracowano również bazę danych urządzeń, elementów składowych oraz bazę wiedzy zawierającą wymagania towarzystw klasyfikacyjnych [2, 74, 77, 80]. Baza danych została utworzona przy pomocy oprogramowania MS Access. W bazie danych zawarto informacje katalogowe dotyczące elementów składowych, parametry modeli oraz możliwość wyboru elementów do symulacji przez użytkownika/projektanta. Bazę wiedzy zrealizowano w środowisku Exsys.

System ekspertowy rozpoczyna pracę od trybu konwersacyjnego, zadaje pytania użytkownikowi, który wprowadza niezbędne dane lub wybiera je z listy. Na podstawie uzyskanej wiedzy system ekspertowy przy wykorzystaniu algorytmów działania wybiera elementy i łączy je w strukturę. Następnie Exsys zleca badanie struktury z elementami z bazy w środowisku symulacyjnym Matlab. W trakcie symulacji badana jest jakość rozwiązań zaproponowanych przez system ekspertowy. Wyniki symulacji są wyświetlane, a następnie zwracane do aplikacji systemu ekspertowego. Dalej system ekspertowy zleca zewnętrznej aplikacji przetworzenie uzyskanych wyników symulacji. Na koniec system ekspertowy dokonuje oceny już przetworzonych wyników symulacji i przedstawia użytkownikowi kompletny raport.

6.3 Algorytm aplikacji doboru struktur i elementów sterów strumieniowych

Jednym z kluczowych elementów determinujących funkcje oraz przydatność aplikacji jest algorytm działania. Użytkownik na początku wprowadza założenia projektowe, które precyzują strukturę projektowanego podsystemu energetycznego statku, parametry (np. moc) oraz ograniczenia wynikające z przepisów towarzystw klasyfikacyjnych. System ekspertowy dobiera kolejno elementy składowe struktur, a następnie wysyła odpowiednie dane dla aplikacji symulacyjnej. Automatycznie wywoływany jest program symulacyjny z modelem struktury podsystemu i przeprowadzana jest seria badań symulacyjnych. Wyniki badań zestawiane są w plikach. Do oceny przebiegów wykorzystywane są procedury oceny wyników badań w postaci wektorowych i skalarnych kryteriów jakości. Wymagania towarzystw klasyfikacyjnych definiowane są jako dopuszczalne obszary, w których ma przebiegać odpowiedź badanego układu na zadane wymuszenie. Przekroczenie dopuszczalnych wartości dyskwalifikuje przydatność danego rozwiązania projektowego. Akceptowalne projekty zostaną porównane i ocenione pod względem jakości przez system ekspertowy, a najlepsze zapisane w postaci plików, które mogą zostać przekształcone na dokumentację techniczną.

Aplikację wspomagającą dobór struktur i elementów sterów strumieniowych podzielono na sześć zasadniczych części:

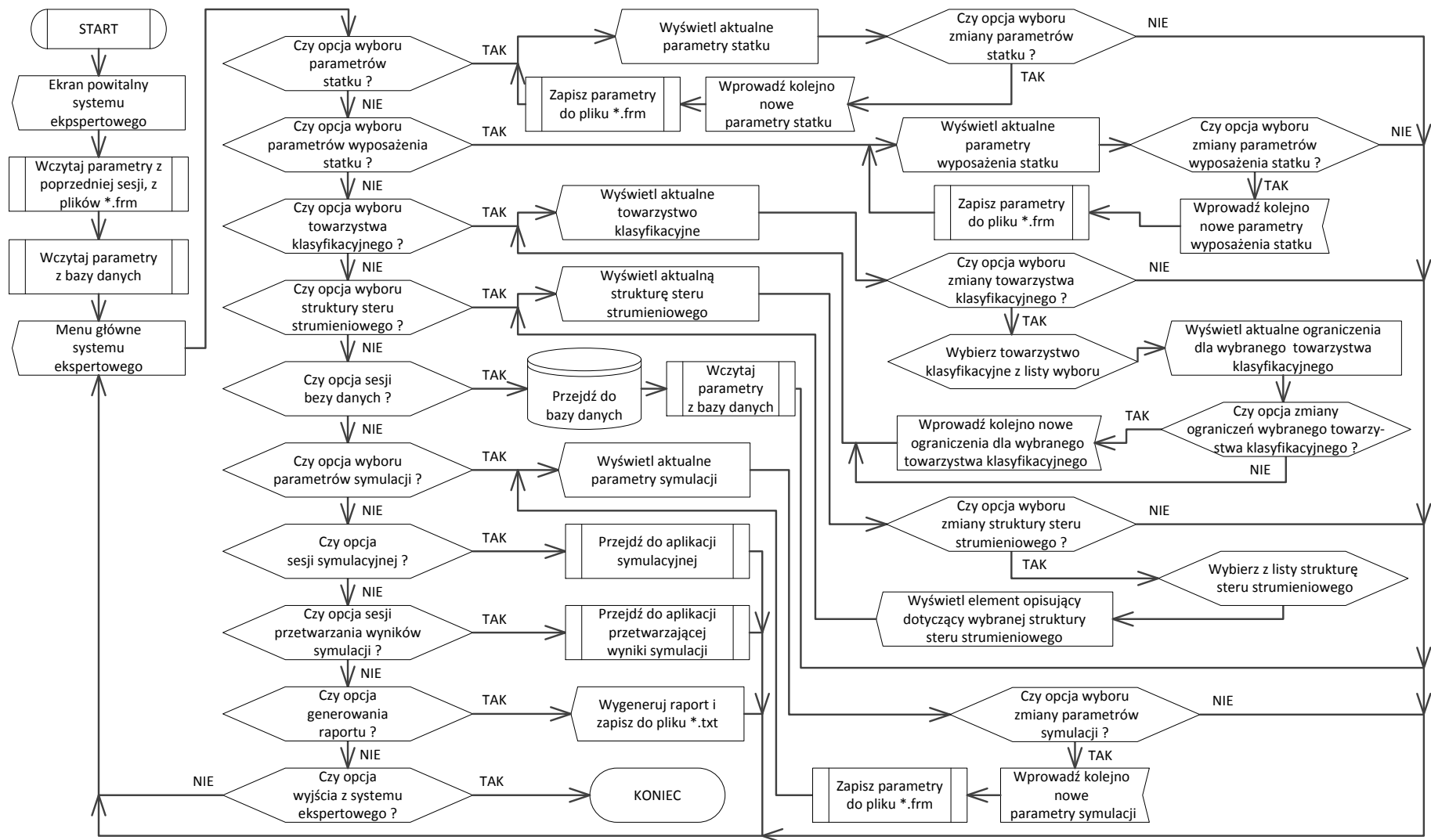
- aplikację systemu ekspertowego zbudowaną w środowisku szkieletowym Exsys Developer, zawierającą reguły wiedzy oraz interfejs umożliwiający komunikację użytkownika/projektanta z systemem,
- bazę danych zawierającą informacje katalogowe oraz parametry modeli używanych w trakcie sesji badań symulacyjnych,
- bibliotekę modeli zbudowaną w środowisku Matlab/Simulink,
- aplikację zestawiającą automatycznie modele w struktury oraz wykonującą badania symulacyjne,
- aplikację przetwarzającą wyniki pomiarowe,
- aplikację generującą raport zawierający dane wejściowe oraz wnioski.

Na rys. 6.2 przedstawiono algorytm działania głównej aplikacji doboru struktur i elementów sterów strumieniowych.

Sesja doboru elementów struktur sterów strumieniowych rozpoczyna się od wyświetlenia ekranu powitalnego, a następnie wczytania parametrów projektowanego statku oraz wyposażenia (wybranych w trakcie poprzedniej sesji), a jak również parametrów elementów z bazy danych.

Parametry statku oraz parametry wyposażenia statku przechowywane są w pliku *parametry_statku.frm*. Parametry symulacji przechowywane są w pliku *parametry_symulacji.frm*. Aplikacja łączy się również z bazą danych opracowaną w środowisku MS Access wykorzystując interfejs ODBC – Open DataBase Connectivity. Interfejs ten pozwala środowisku Exsys połączyć się z bazą danych. Po połączeniu informacje dotyczące wybranych elementów mogą być odczytywane z bazy danych.

Użytkownik korzystając z menu głównego aplikacji systemu ekspertowego wybiera żądane opcje, wprowadza parametry, odczytuje pliki raportu.



Rys. 6.2. Algorytm aplikacji doboru struktur i elementów sterów strumieniowych

6.4 Interfejs graficzny użytkownika aplikacji doboru struktur i elementów sterów strumieniowych

Opracowany interfejs użytkownika umożliwiający interakcję użytkownika z aplikacją składa się z trzech zasadniczych elementów: komunikacji między systemem ekspertowym a użytkownikiem, komunikacji między bazą danych a użytkownikiem oraz przekazywanie informacji/pomocy użytkownikowi.

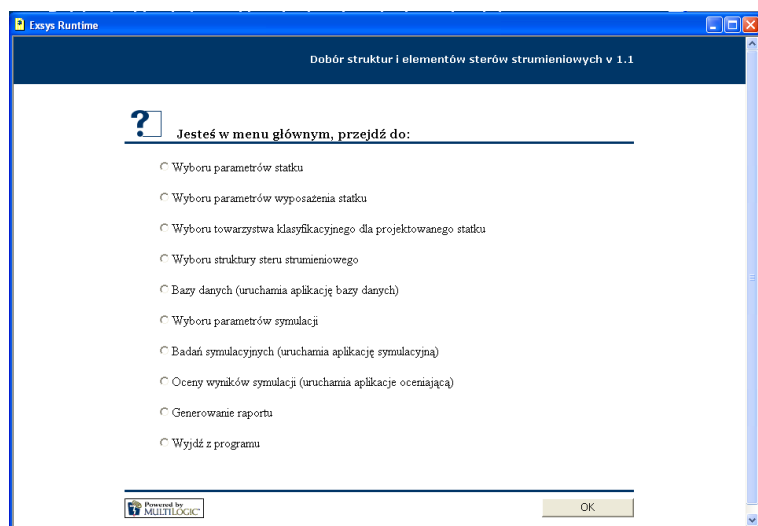
Po uruchomieniu systemu ekspertowego, użytkownikowi przedstawiony zostaje ekran powitalny pokazany na rys. 6.3. Następnie użytkownik przechodzi do menu głównego.

W menu głównym przedstawionym na rys. 6.4 użytkownik ma możliwość jednokrotnego wyboru. Po wybraniu następuje przejście do jednego z elementów podrzędnych menu głównego lub uruchomienie wybranej aplikacji.

W przypadku wybrania przez użytkownika pierwszej pozycji w menu głównym, czyli „wyboru parametrów statku”, otwarte zostaje okno podrzędne, w którym użytkownik może odczytać aktualnie wybrane parametry (siła wiatru, powierzchnia boczna statku, na którą oddziałuje wiatr, długość statku, odległość



Rys. 6.3. Okno powitalne aplikacji wspomagającej dobór struktur i elementów sterów strumieniowych statków



Rys. 6.4. Menu główne aplikacji wspomagającej dobór struktur i elementów sterów strumieniowych statków

osi obrotu statku od osi zamontowania tunelu) oraz obliczone parametry statku (wymagany moment wytwarzany przez ster, wymagana siła naporu wytwarzana przez ster). Okno umożliwia również zmianę aktualnych parametrów statku, co spowoduje ponowne obliczenie przez system ekspertowy wymaganego momentu oraz siły naporu wytwarzanych przez ster. W przypadku akceptacji aktualnych parametrów następuje powrót do menu głównego.

Ponadto użytkownik może z menu głównego przejść do:

- wyboru parametrów wyposażenia elektrycznego statku,
- wyboru towarzystwa klasyfikacyjnego dla projektowanego statku,
- wyboru struktury steru strumieniowego,
- bazy danych (uruchomiona zostaje baza danych Access,

- wyboru parametrów, badań symulacyjnych (uruchomiona zostaje aplikacja symulacyjna Matlab/Simulink),
- aplikacji przetwarzającej dane z symulacji (uruchomiona zostaje aplikacja przetwarzająca wyniki symulacji Matlab),
- wyjścia z programu.

6.5 Biblioteka struktur sterów strumieniowych

Jednym z ważnych aspektów projektowania nowoczesnych układów sterowania jest możliwość stosowania oraz badania różnych struktur. Systemy sterowania stosowane m.in. w przemyśle stoczniowym można przedstawić jako wzajemnie oddziaływujące podsystemy. Analiza złożonych układów sterowania podsystemów elektroenergetycznych statków sprowadza się nie tylko do badania ich podstawowych własności takich jak stabilność i wrażliwość, lecz także do poznania wpływu charakterystyk i powiązań strukturalnych bloków składowych na właściwości całego systemu [5, 40].

W projekcie aplikacji przyjęto możliwość badania typowych aktualnie wykorzystywanych rozwiązań układów sterów strumieniowych, w których struktura powiązań elementów i ich liczba jest ściśle określona. System ekspertowy korzystając z reguł wiedzy, układu elementy w struktury.

Wszystkim dopuszczalnym elementom przypisane są wartości {0} lub {1}, gdzie {0} oznacza brak elementu w strukturze, natomiast {1} oznacza istnienie elementu w strukturze. Ponadto w systemie przewidziano możliwość ręcznego wybierania elementów przez użytkownika. Umożliwia to próbę budowy nowej struktury niewykorzystywanej dotychczas, a następnie jej przebadanie.

6.6 Baza elementów

Elementy umieszczone w bazie mają odpowiednie atrybuty. Informacje o elementach zapisane są w postaci bazy danych (MS Access), z której potrafi korzystać aplikacja systemu ekspertowego. Wykorzystano relacyjną bazę danych umożliwiającą tworzenie relacji jeden do jednego, jeden do wielu oraz wiele do wielu. Baza danych ponadto została wyposażona w graficzny interfejs użytkownika. Umożliwia on przeglądanie oraz aktualizację bazy danych przy pomocy specjalnie do tego przygotowanych formularzy [9]. Interfejs zrealizowanej bazy w środowisku MS Access przedstawiono na rys. 6.5. W oknie głównym aplikacji (bazy elementów), użytkownik może przeglądać karty katalogowe elementów oraz karty z informacjami o producentach.

Przesyłanie informacji pomiędzy bazą danych, a systemem ekspertowym oraz środowiskiem Matlab/Simulink realizowane jest w sposób automatyczny przy wykorzystaniu interfejsu ODBC.



Rys. 6.5. Okno główne bazy elementów składowych struktur sterów strumieniowych statków zrealizowane w środowisku MS Access

6.7 Baza wiedzy

W bazie wiedzy umieszczono zbiór relacji między danymi zebranymi w trakcie realizacji aplikacji systemu ekspertowego. Relacje te zawarto w postaci reguł oraz instrukcji wewnątrz skryptów aplikacji systemu ekspertowego. Wiedza zebrana w bazie wiedzy pochodzi od projektantów/ekspertów, literatury przedmiotu [7, 8, 10, 11, 14, 24, 26, 29, 32] oraz z raportów badawczych [58–64] związanych z wcześniej realizowanymi w Politechnice Gdańskiej projektami badawczymi.

W systemie z bazą wiedzy, wiedza może być reprezentowana w postaci struktur drzewiastych oraz reguł, które zapisujemy w postaci:

IF przesłanka **THEN** konkluzja1 **ELSE** konkluzja2.

W przesłankach oraz konkluzjach mogą pojawić się trzy typy elementów:

- zmienne (ang. variables) typu liczbowego lub tekstowego,
- pytania (ang. questions) połączone z listą odpowiedzi,
- cele (ang. goals) – wyniki wnioskowania.

Elementy struktur sterów strumieniowych aplikacja systemu ekspertowego dobiera z wykorzystaniem biblioteki struktur sterów strumieniowych.

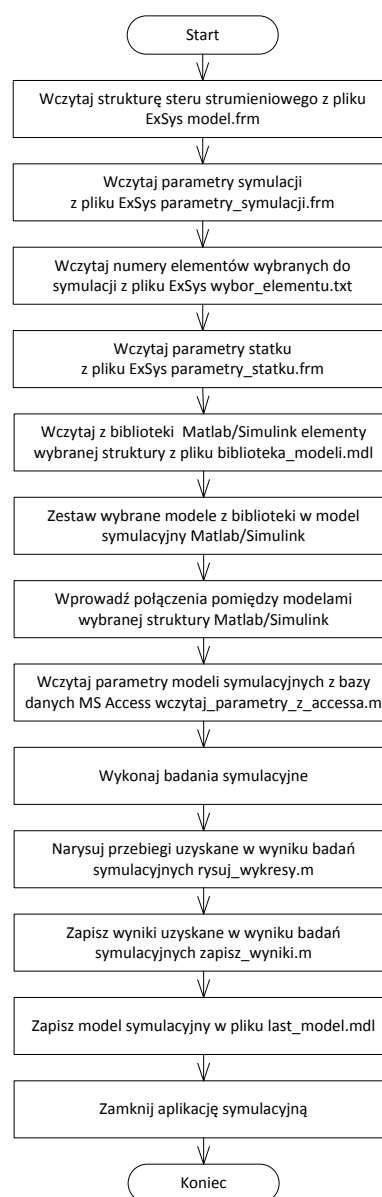
Opracowano również algorytm doboru pytań o elementy struktury steru strumieniowego statku wybieranej w trybie ręcznym.

Aplikacja dokonuje również niezbędnych obliczeń np. wyznacza wymaganą wartość siły naporu wytwarzanej przez ster strumieniowy statku.

6.8 Algorytm aplikacji symulacyjnej

W celu wykonywania badań symulacyjnych wykorzystywane jest środowisko symulacyjne Matlab/Simulink. Aplikacja symulacyjna wykorzystuje informacje przekazywane przez szkieletowy system ekspertowy Exsys w postaci plików *.frm. W ten sposób uzyskuje informacje o elementach wybranej struktury, parametrach statku i jego wyposażeniu oraz parametrach symulacji. W aplikację symulacyjną wbudowano bibliotekę modeli mogących wchodzić w skład struktur sterów strumieniowych.

Algorytm działania aplikacji symulacyjnej przedstawiony jest na rys. 6.6. Aplikacja symulacyjna pobiera z biblioteki wybrane modele i automatycznie łączy je w struktury. Ponadto aplikacja symulacyjna korzysta z bazy danych w środowisku MS Access, pobierając z niej dane katalogowe wybranych modeli oraz ich parametry. Cały ten proces zarządzany jest



Rys. 6.6. Struktura skryptu aplikacji symulacyjnej wykorzystywanej do wspomagania projektowania podsystemu steru strumieniowego statku

przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu działania aplikacji symulacyjnej.

Aby zautomatyzować działanie aplikacji symulacyjnej opracowano specjalne pliki skryptowe tzw. m-pliki. Dodatkowo kod programu podzielono na części w celu poprawy przejrzystości kodu program.

Modele pobrane z biblioteki są automatycznie rozkładane w oknie, a następnie łączone. W kolejnym kroku aplikacja symulacyjna łączy się z bazą danych i wczytuje niezbędne parametry modeli. Po wczytaniu modeli z biblioteki, połączeniu ich w struktury, wczytaniu parametrów modeli, aplikacja przechodzi do badań symulacyjnych. Symulacje trwają od kilku do kilkunastu minut, głównie w zależności od wybranej struktury oraz metody całkowania. Następnie wyniki są zapisywane do osobnych plików i prezentowane w postaci wykresów. Aplikacja symulacyjna po wykonaniu wszystkich wcześniej opisanych kroków zostaje zamknięta i następuje powrót do systemu ekspertowego.

6.9 Aplikacja przetwarzająca wyniki z symulacji

W wyniku symulacji przeprowadzonych w środowisku Matlab/Simulink pozyskiwane są wyniki symulacji zapisane w postaci macierzy. Ponieważ system ekspertowy Exsys Developer nie jest przystosowany do przetwarzania w prosty sposób wielu informacji w postaci macierzy, zdecydowano się wstępnie przetworzyć wyniki symulacji. Aplikacja przetwarza uzyskane wyniki symulacji - operuje na macierzach, w których zapisane są charakterystyki (np. wykres wartości skutecznej prądu pobieranego przez silnik indukcyjny). Następnie aplikacja przetwarzająca wyniki symulacji wyodrębnia z charakterystyk wybrane wskaźniki jakości uzyskanych rozwiązań. Wybrane parametry są przekazywane do systemu ekspertowego przy wykorzystaniu pliku *ocena_wynikow_symulacji.dat*. W kolejnym kroku przetworzone wyniki symulacji podlegają ocenie przez system ekspertowy z wykorzystaniem bazy wiedzy. System ekspertowy wyciągnięte wnioski przedstawia użytkownikowi w postaci raportu.

6.10 Podsumowanie

Omówiona hybrydowa aplikacja systemu ekspertowego służy komputerowemu wspomaganie procesu doboru elementów struktur oraz układów sterowania sterów strumieniowych statków.

Podejście do rozpatrywanego zagadnienia jest trzypoziomowe:

- na pierwszym etapie użytkownik/projektant wprowadza założenia projektowe, które system ekspertowy wykorzystuje do wykonania wstępnych obliczeń (system dobiera liczbę sterów strumieniowych oraz przybliżoną moc),
- na drugim etapie użytkownik/projektant ma możliwość przeprowadzenia badań wykorzystując uproszczone struktury (np. z pominięciem wpływu wysokoprężnego silnika spalinowego oraz generatora, a co za tym idzie spadków napięć podczas rozruchu silnika indukcyjnego),
- na trzecim etapie użytkownik może wybrać do badań symulacyjnych kompletne struktury i badać wzajemne oddziaływanie elementów tych struktur.

Na każdym etapie użytkownik może zlecić systemowi ekspertowemu wygenerowanie raportu, w którym system ekspertowy wskaże aktualnie wybrane parametry/elementy oraz oceni ich zgodność z wymaganiami stawianymi w założeniach oraz przepisach towarzystw klasyfikacyjnych.

W trakcie budowy aplikacji systemu ekspertowego przyjęto automatyzację procesów takich jak:

- dobór elementów do wybranej struktury,

- uruchamianie środowiska symulacyjnego,
- zestawianie modeli wybranych elementów w środowisku symulacyjnym,
- łączenie modeli w środowisku symulacyjnym,
- przekazywanie parametrów modeli z bazy danych do środowiska symulacyjnego z bazy danych,
- przekazywanie parametrów symulacji do środowiska symulacyjnego z systemu ekspertowego,
- uruchamianie środowiska symulacyjnego,
- wykonywanie badań symulacyjnych,
- zapisywanie wyników symulacji w postaci wykresów,
- zamykanie środowiska symulacyjnego,
- wyodrębnianie wartości charakterystycznych z wykresów uzyskanych w trakcie symulacji,
- przekazywanie wartości charakterystycznych do systemu ekspertowego,
- ocenę wyników symulacji przez system ekspertowy,
- odczytywanie oraz zapisywanie parametrów projektowanych układów wprowadzanych przez użytkownika,
- generowanie raportu,
- zbieranie informacji w postaci bazy danych umożliwiającej przeglądanie elementów oraz ich parametrów,
- przygotowanie aplikacji umożliwiającej dobór parametrów modeli matematycznych na podstawie danych uzyskanych w rzeczywistych pomiarach.

Dotychczas proponowane systemy ekspertowe wspomagające projektowanie opierały się głównie na porównywaniu nowych rozwiązań projektowych z już istniejącymi. Jednym z nich był zaproponowany wcześniej przez zespół pod kierownictwem prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Kowalskiego system generujący opisy techniczne w zakresie automatyki siłowni statku, realizowany w ramach projektu badawczego nr 8T11A00813 KBN na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Ponieważ tematyka związana z wykorzystaniem archiwalnych rozwiązań była poruszana wcześniej, zdecydowano się ją pominąć w niniejszej rozprawie.

7. BADANIA WYBRANEJ STRUKTURY STERU STRUMIENIOWEGO STATKU

7.1 Wprowadzenie

Pierwszą fazą pracy z opracowaną aplikacją systemu ekspertowego jest tryb konwersacyjny, w którym operator/projektant wprowadza założenia projektowe i dobiera strukturę. Na tym etapie aplikacja systemu ekspertowego, korzystając z założeń wprowadzonych przez operatora, dokonuje obliczeń statycznych i podpowiada, jakie elementy powinny znaleźć się w wybranej strukturze. Następnie operator dobiera elementy składowe wybranej struktury oraz program badań symulacyjnych. Kolejnym etapem jest automatyczne zestawienie modeli elementów składowych wybranej struktury w środowisku symulacyjnym i przeprowadzenie dynamicznych badań symulacyjnych. Dane uzyskane w wyniku symulacji zapisywane są do plików. Następnie uruchamiana jest aplikacja oceniająca uzyskane wyniki symulacyjne. W rezultacie działania aplikacji oceniającej wyniki symulacji, przekazywane są informacje do aplikacji systemu ekspertowego (np. czas rozruchu silnika indukcyjnego, maksymalny prąd rozruchowy). Aplikacja systemu ekspertowego ocenia projekt z wykorzystaniem kryteriów, na które składa się wiedza eksperta, przepisy towarzystw klasyfikacyjnych oraz przetworzone wyniki badań symulacyjnych. Jeżeli struktura i jej elementy składowe spełniają przyjęte kryteria, wówczas otrzymujemy poprawne rozwiązanie projektowe. Gdy testowany

układ nie spełni przyjętych kryteriów, wówczas system ekspertowy w raporcie informuje operatora o tym fakcie i daje mu możliwość podjęcia dalszych decyzji np. ponownego doboru nastaw regulatora/parametrów symulacji, ponownego doboru elementów składowych wybranej struktury, zmianę struktury układu steru strumieniowego lub zmianę założeń projektowych. Na zakończenie, po wykonaniu badań symulacyjnych, ocenie uzyskanych wyników oraz zbadaniu ich zgodności z założeniami i przepisami towarzystw klasyfikacyjnych, generowany jest raport końcowy, w którym użytkownik może przejrzeć założenia początkowe oraz wyniki symulacji i podsumowanie. Opracowana aplikacja oraz raport mogą posłużyć jako element przyspieszający wstępne etapy projektowania (np. projekt ofertowy) lub jako element ułatwiający analizę oraz weryfikację przyjętych założeń wstępnych.

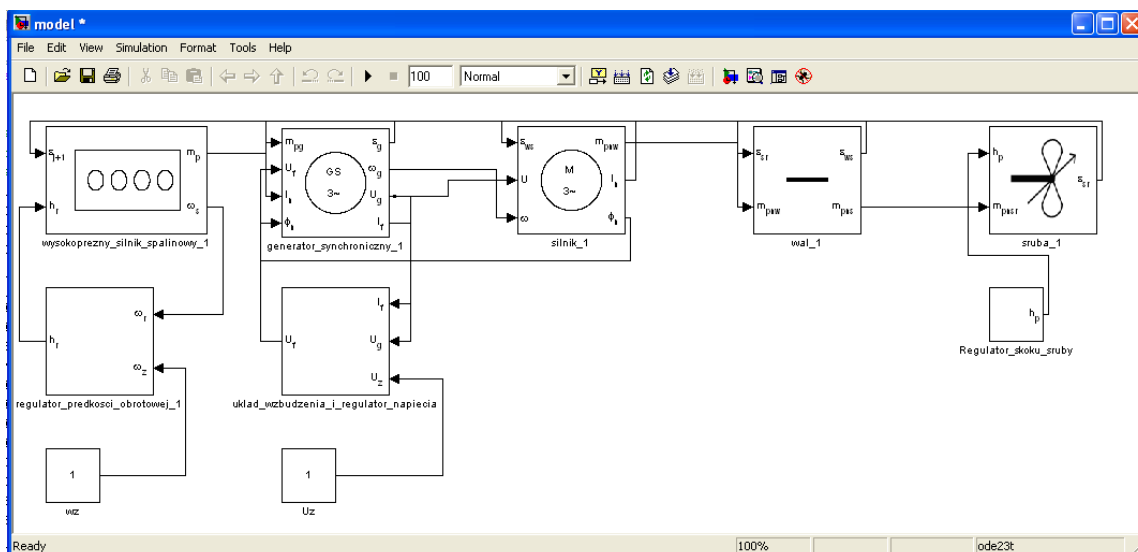
7.2 Założenia/parametry początkowe

Pierwszym elementem pracy z systemem ekspertowym jest wprowadzenie przez operatora założeń oraz parametrów początkowych. Użytkownik wprowadza siłę wiatru w skali Beauforta, powierzchnię statku, na którą oddziałuje wiatr, długość statku oraz odległość osi obrotu statku od osi zamontowania tunelu steru strumieniowego. Na tej podstawie system ekspertowy oblicza wymagany moment oraz wymaganą siłę naporu wytwarzaną przez ster strumieniowy. W kolejnym kroku użytkownik wybiera liczbę zainstalowanych generatorów, moc każdego zainstalowanego generatora, długość linii zasilającej, przekrój kabla zasilającego, konduktywność przewodu. Kolejnym ważnym elementem jest wybór towarzystwa klasyfikacyjnego, którego wymaganiom powinien sprostać projektowany statek. Przyjęte towarzystwo klasyfikacyjne to PRS – Polski Rejestr Statków [80]. Następnie użytkownik dokonuje wyboru struktury steru strumieniowego. Przyjęta struktura steru strumieniowego to struktura z rozruchem bezpośrednim. Użytkownikowi systemu ekspertowego po wyborze struktury zostanie wyświetlona informacja opisująca wybraną strukturę w formie strony WWW. Następnie operator przechodzi do bazy danych zrealizowanej w środowisku MS Access. W bazie danych użytkownik ma możliwość przeglądania oraz wprowadzania nowych elementów mogących wchodzić w skład struktur sterów strumieniowych oraz może wybrać z bazy elementy, które mają zostać wykorzystane w trakcie sesji badań symulacyjnych. Ostatnim krokiem, jaki musi wykonać operator jest wprowadzenie parametrów symulacji. Użytkownik wybiera: czas załączenia generatora T_z , czas załączenia silnika T_{zs} , kąt α_{hp} nachylenia krzywej skoku h_p śruby, czas załączenia skoku A śruby T_{zHpA} , czas załączenia skoku B śruby T_{zHpB} , czas wyłączenia skoku śruby T_{wHp} , czas symulacji T_s oraz opcjonalnie dodatkowe parametry symulacji w przypadku zastosowania dwóch generatorów lub/i dwóch silników oraz śrub. Omówione założenia/parametry mogą być poprawiane na każdym etapie działania aplikacji. Ostatnio przyjęte parametry są przechowywane w plikach i podczas kolejnego uruchomienia systemu ekspertowego są używane jako parametry początkowe, które operator może zmienić.

7.3 Badania symulacyjne oraz ocena wyników symulacji

Kluczowym elementem omawianej aplikacji systemu ekspertowego jest moduł symulacyjny. Po wprowadzeniu założeń projektowych oraz parametrów początkowych użytkownik może zweryfikować dobraną strukturę oraz wybrane jej elementy na drodze badań symulacyjnych on-line. Aplikacja pobiera automatycznie modele z biblioteki, a następnie zestawia je w środowisku Matlab/Simulink. Przykładowy model badanej struktury steru strumieniowego z rozruchem bezpośrednim przedstawiono na rys. 7.1. Elementami badanej struktury są modele matematyczne elementów takich jak: wysokoprężny silnik spalinowy, regulator prędkości obrotowej silnika wysokoprężnego, generator synchroniczny, statyczny tyrystorowy układ wzbudzenia i regulator napięcia generatora synchronicznego, silnik

indukcyjny, wał śrubowy, śruba o zmiennym skoku, regulator skoku śruby, bloki zadające wartość prędkości kątowej silnika spalinowego oraz napięcia generatora.

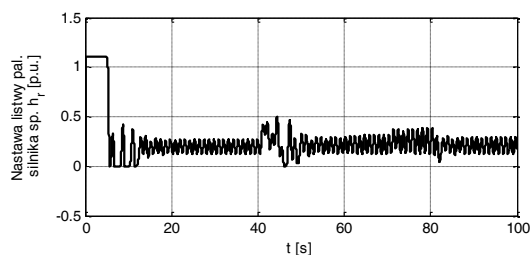


Rys. 7.1. Struktura badanego podsystemu elektroenergetycznego – steru strumieniowego

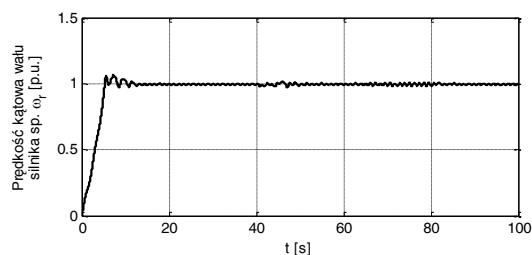
Aplikacja symulacyjna pobiera parametry modeli matematycznych z bazy danych MS Access oraz parametry symulacji z plików przygotowanych przez system ekspertowy. Następnie uruchamiana jest sesja badań symulacyjnych, która dla przedstawionego przykładu trwa 91 s. W trakcie pracy aplikacji symulacyjnej wyświetlane są w trybie tekstowym bieżące informacje dotyczące aktualnie wykonywanych procesów. W wyniku badań symulacyjnych uzyskano szereg przebiegów symulowanych (rys. 7.2 ÷ rys. 7.11). Wybrane przebiegi symulowane to: przebieg nastaw listwy paliwowej h_r silnika spalinowego, prędkości kątowej wału ω_r silnika spalinowego, wartości skutecznej napięcia U_g generatora synchronicznego, wartości stałego napięcia wzbudzenia U_f generatora synchronicznego, wartości skutecznej napięcia wejściowego U_{we} silnika elektrycznego, wartości skutecznej prądu I_n silnika elektrycznego, przesunięcia fazowego prądu $\cos(\varphi_n)$ silnika elektrycznego, momentu m_E silnika elektrycznego, skoku h_p śruby nastawnej, obrotów n silnika elektrycznego. Osie rzędnych przebiegów wyrażone są w jednostkach względnych, natomiast osie odciętych w sekundach.

Po zakończeniu badań symulacyjnych, aplikacja zapisuje do plików wyniki symulacyjne oraz zestawiony model, w celu umożliwienia dalszej obróbki.

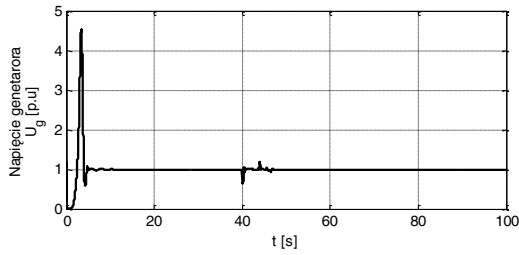
Wybranie z menu głównego „oceny badań symulacyjnych” powoduje uruchomienie aplikacji automatycznie odczytującej z wykresów istotne informacje i zapisującej je w pliku tekstowym. Dane te wykorzystuje system ekspertowy podczas generowania raportu – porównuje z wymaganiami wybranego towarzystwa klasyfikacyjnego oraz przedstawia wnioski.



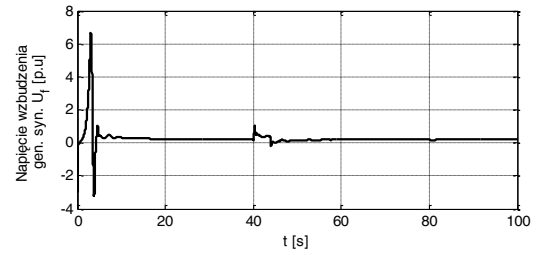
Rys. 7.2. Symulowany przebieg nastaw listwy paliwowej h_r silnika spalinowego



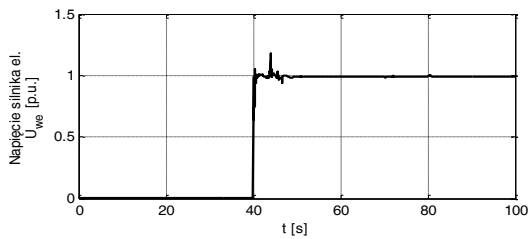
Rys. 7.3. Symulowany przebieg prędkości kątowej wału ω_r silnika spalinowego



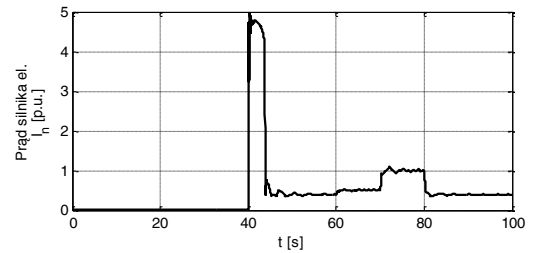
Rys. 7.4. Symulowany przebieg wartości skutecznej napięcia U_g generatora synchronicznego



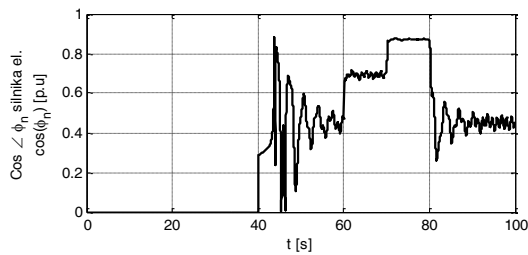
Rys. 7.5. Symulowany przebieg wartości stałego napięcia wzbudzenia U_f generatora synchronicznego



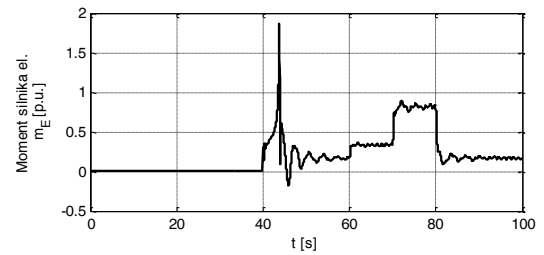
Rys. 7.6. Symulowany przebieg wartości skutecznej napięcia wejściowego U_{we} silnika elektrycznego



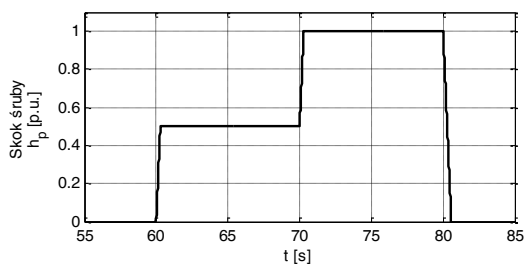
Rys. 7.7. Symulowany przebieg wartości skutecznej prądu I_n silnika elektrycznego



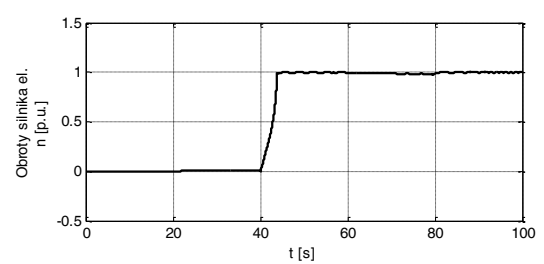
Rys. 7.8. Symulowany przebieg przesunięcia fazowego prądu $\cos(\varphi_n)$ silnika elektrycznego



Rys. 7.9. Symulowany przebieg momentu m_E silnika elektrycznego



Rys. 7.10. Symulowany przebieg skoku h_p śruby nastawnej



Rys. 7.11. Symulowany przebieg obrotów n silnika elektrycznego

7.4 Raport końcowy systemu ekspertowego

Raport generowany jest w sposób automatyczny po wybraniu opcji „generowanie raportu” z menu głównego aplikacji systemu ekspertowego. Raport przedstawiany jest użytkownikowi w postaci tekstowej. Plik raportu zawiera informacje takie jak:

- dane początkowe (nazwa stoczni, typ statku, nośność statku, osoba kontaktowa, wersja aplikacji),
- wybrane towarzystwo klasyfikacyjne,
- przyjęte założenia projektowe,
- obliczone przez system parametry statku,
- przykład doboru steru strumieniowego z typoszeregu firmy ABB,
- przyjęte parametry wyposażenia elektrycznego statku,
- wybraną strukturę steru strumieniowego,
- elementy wybranej struktury steru strumieniowego,
- wyniki oceny symulacji przez zewnętrzną aplikację oceniającą,
- wnioski końcowe raportu systemu ekspertowego.

W raporcie oprócz obliczonych przez system parametrów statku, przykładu doboru steru strumieniowego, parametrów wybranych elementów wyposażenia statku oraz wniosków końcowych, umieszczone są również informacje o wprowadzonych przez użytkownika parametrach.

Proces projektowania jest procesem iteracyjnym. Użytkownik po wygenerowaniu raportu może zmienić wybrane parametry i wprowadzone dane. Następnie może ponownie wykonać badania symulacyjne i zapoznać się z nowym raportem. Proces ten jest powtarzany, aż do uzyskania oczekiwanych rezultatów. W raporcie znajdują się informacje o przyjętych przez użytkownika założeniach, obliczone przez system ekspertowy parametry statku oraz wnioski końcowe.

7.5 Podsumowanie

Prowadzenie badań symulacyjnych ułatwia obserwację procesów zachodzących podczas rozruchu i obciążania podsystemu steru strumieniowego statku. Pomaga np. określić maksymalne wartości prądów silnika i zbadać wpływ rozruchu silnika na pracę elektrowni statku. Wyniki symulacji są przydatne w trakcie oceny jakości zestawionej struktury i spełniania przez nią wymogów stawianych przez przepisy towarzystw klasyfikacyjnych.

Automatyzacja zestawiania modeli oraz przesyłanie informacji pomiędzy modułami systemu ekspertowego są przydatne szczególnie na wstępnych etapach projektowania. Wygenerowane raporty mogą posłużyć celom informacyjnym lub jako załączniki do projektu. W przypadku bardziej rozbudowanych systemów raportowania, mogą być tworzone przy ich wykorzystaniu projekty w środowiskach typu CAD.

8. ZAKOŃCZENIE

W rozprawie udowodniono przyjętą na wstępie tezę pracy: możliwe jest wykorzystanie informacji pozyskanych od ekspertów oraz uzyskanych w wyniku badań symulacyjnych jako źródła wiedzy, niezbędnej do funkcjonowania systemu z bazą wiedzy, wspomagającego częściową automatyzację procesu projektowania oraz doboru układów sterowania sterów strumieniowych statków, w postaci pozwalającej na jego bezpośrednie i praktyczne wykorzystanie przez projektantów, konstruktorów, jak i studentów.

W pracy wykorzystano uzyskane i opublikowane przez autora rozprawy wyniki w postaci artykułów dotyczących:

- doboru parametrów modeli matematycznych przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych [45],
- zastosowania modeli matematycznych przy projektowaniu steru strumieniowego statku oraz napędu elektrycznego statku [46],

- wykorzystania środowiska systemu ekspertowego do projektowania wybranych podsystemów elektroenergetycznych statków [43],
- zastosowania modeli matematycznych przy projektowaniu podsystemów elektroenergetycznych statków [44],
- analizy możliwości zastosowania środowiska Scilab do wspomagania projektowania podsystemów energetycznych statków [40],
- badań symulacyjnych rozruchu silnika indukcyjnego steru strumieniowego statku [41],
- doboru parametrów silnika indukcyjnego dużej mocy [42],
- badań symulacyjnych prowadzonych w środowisku systemu ekspertowego, stosowanych do wspomagania projektowania układów automatyki statku [52],

oraz prace niepublikowane, [58–62] powstałe w trakcie realizacji grantu nr 4T11A00925 Komitetu Badań Naukowych, przy współudziale autora rozprawy.

W celu udowodnienia tezy pracy zrealizowano aplikację systemu ekspertowego dla wspomagania projektowania podsystemu steru strumieniowego statku. Ponadto zrealizowano szereg elementów składowych aplikacji systemu ekspertowego: bazę wiedzy, bazę danych, bibliotekę struktur sterów strumieniowych, bibliotekę modeli matematycznych, zautomatyzowaną aplikację symulacyjną, aplikację oceniającą wyniki symulacji, aplikację generującą raport. Opracowano również aplikację dobierającą parametry modeli matematycznych z wykorzystaniem algorytmu genetycznego.

W celu realizacji aplikacji systemu ekspertowego oraz jej elementów składowych wykorzystano narzędzia takie jak: Exsys, MS Access, Matlab/Simulink, Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox oraz elementy języków takich jak: HTML i CSS w celu opracowania pomocy dla użytkownika systemu ekspertowego.

Zbudowana prototypowa aplikacja systemu ekspertowego służy przedstawieniu możliwości zastosowania aplikacji hybrydowego systemu ekspertowego składającego się z bazy danych, reguł wnioskowania, aplikacji symulacyjnej wykonującej badania symulacyjne on-line oraz aplikacji oceniającej do wspomagania projektowania wybranego fragmentu podsystemu elektroenergetycznego statku – steru strumieniowego. Zdobyta wiedza oraz doświadczenie zebrane podczas budowy omawianej aplikacji systemu ekspertowego pozwala stwierdzić, że:

- omawiana aplikacja systemu ekspertowego może wspomagać pracę projektantów na różnych etapach projektowania statków,
- budowa komercyjnej aplikacji systemu ekspertowego wymaga dość dużych nakładów finansowych,
- wdrożenie aplikacji systemu ekspertowego wymaga dbałości o aktualność bazy elementów,
- zbudowanie kompletnej bazy wiedzy wymaga zatrudnienia co najmniej kilku projektantów/ekspertów w celu pozyskania od nich wiedzy.

Opracowana aplikacja systemu z bazą wiedzy została zweryfikowana na przykładach projektowych, z wykorzystaniem symulacji on-line. Analiza raportów podsumowujących pracę systemu wspomagającego analizę i dobór układów sterowania sterami strumieniowymi statków, potwierdza użyteczność systemu jako narzędzia wspomagającego pracę projektanta.

W przyszłości autor rozprawy zamierza zająć się uzupełnieniem biblioteki modeli o brakujące elementy oraz opracowaniem bardziej szczegółowych modeli elementów składowych podsystemu elektroenergetycznego statku. W polu zainteresowań autora pozostaje również dalszy rozwój modeli hybrydowych.

Opracowane modele połączone w struktury mogą zostać włączone w stanowiska wyposażone w sterowniki programowalne. Z uwagi na duże gabaryty elementów mogących wchodzić w skład struktur sterów strumieniowych, wysokie koszty ich zakupu oraz utrzymania, zamodelowane struktury mogą znaleźć zastosowanie w trakcie realizacji symulatora steru strumieniowego umożliwiającego naukę programowania aplikacji sterujących.

Autor w dalszej pracy nad wdrożeniem systemu wspomagania doboru sterów strumieniowych zamierza wystąpić o przyznanie dofinansowania ze środków publicznych lub/i poszukiwać firmy lub konsorcjum firm zainteresowanych zaangażowaniem środków własnych na realizację takiego projektu. Aktualnie wiele projektów realizowanych jest na zasadzie wolnego oprogramowania (ang. free software) [79]. W przypadku utrudnionego dostępu do środków finansowych, wydaje się być zasadne zbudowanie elementów systemu wspomagania doboru sterów strumieniowych w postaci ogólnodostępnej, internetowej aplikacji. Do bazy danych mogliby się logować producenci wprowadzając swoje produkty (co nie generowałoby kosztów po stronie użytkowników późniejszego systemu ekspertowego). Interes producentów zaangażowanych w taki projekt wydaje się być oczywisty, gdyż powoduje zwiększenie portfela potencjalnych odbiorców dla wytwarzanych przez nich elementów. Ponadto zbudowaną na potrzeby niniejszej rozprawy bibliotekę modeli można umieścić w sieci Internet, jako wolne oprogramowanie. Umożliwiłoby to badanie modeli znajdujących się w bibliotece przez wiele osób oraz sugerowanie przez użytkowników konieczności nanoszenia poprawek. W ten sposób system ekspertowy oraz jego elementy mogłyby być nieustannie poprawiane bez ponoszenia znacznych nakładów na ten cel.

9. BIBLIOGRAFIA

I. Książki:

- 1 Amborski K.: *Podstawy metod optymalizacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009. ISBN 978-83-7207-794-3.
- 2 American Bureau of Shipping: *Rules for building and classing*. part 4, vessel systems and machinery. ABS, Houston 2002.
- 3 Anuszczyk J.: *Maszyny elektryczne w energetyce*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2006. ISBN 83-204-3247-2.
- 4 Arabas J.: *Wykłady z algorytmów genetycznych*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2001. ISBN 83-204-2970-6.
- 5 Arendt R.: *Hierarchiczne modele hybrydowe systemu energetycznego statku o definiowanej strukturze*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
- 6 Armstrong R. J.: *Getting started in powerboating*. Mac Graw Hill, New York 2005.
- 7 Bohdanowicz J.: *Elektrotechnika okrętowa: napędy elektryczne*. Wydawnictwo Uczelniane WSM Gdynia, Gdynia 2002.
- 8 Bohdanowicz J., Gil A.: *Zautomatyzowane napędy okrętowe*. Wydawnictwo Uczelniane WSM Gdynia, Gdynia 1986.
- 9 Domka P.: *Bazy danych i systemy baz danych*. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2013. ISBN 978-83-02-13414-2.
- 10 Dymarski C.: *Okrętowe śruby nastawne*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2009. ISBN 978-83-7348-393-4.
- 11 Galbas J., Krajczyński Z., Lisowski L.: *Okrętowe stery strumieniowe*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1986. ISBN 83-215-0576-7.
- 12 Gildberg D. E.: *Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003. ISBN: 83-204-2843-2.
- 13 Grunwald Z., i in.: *Napęd elektryczny*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987. ISBN 83-204-0802-4.
- 14 Górski Z., Perepeczko A.: *Okrętowe maszyny i urządzenia pomocnicze*. Tom II. Wydawnictwo Tademar, Gdynia 1998. ISBN 83-905-4123-8.
- 15 Ignizio J. P.: *An introduction to expert systems*. Wydawnictwo McGraw-Hill, New York 1991. ISBN 0-07-909785-5.
- 16 Jadric I.: *Modelling and control of a synchronous generator with electronic load*. Wydawnictwo Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg 1998.
- 17 Kalus M., Skoczkowski T.: *Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego*. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2003.
- 18 Kowalski Z.: *Badania symulacyjne podsystemów napędowych statków*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1980. ISSN 0373-8647.
- 19 Kowalski Z., Tittenbrum S., Łastowski W.F.: *Regulacja prędkości obrotowej okrętowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1988. ISBN 83-215-0579-1.
- 20 Krause P. C.: *Analysis of electrical machinery*. Institute of Electrical & Electronics Enginee, New York 1995.
- 21 Krause, P.C.: *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, 1986, Section 12.5.
- 22 Krzemiński Z.: *Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001. ISBN 83-88007-75-0.

- 23 Kundur P.: *Power system stability and control*. Wydawnictwo McGraw-Hill, Inc., California 1994. ISBN: 007035958X/ ISBN-13: 978-00-703595-8-1.
- 24 Lisowski J.: *Statek jako obiekt sterowania automatycznego*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1981. ISBN 83-215-0565-1.
- 25 Michalewicz Z.: *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003. ISBN 83-204-2881-5.
- 26 Michalski J.: *Podstawy teorii projektowania okrętów*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013. ISBN 978-83-734849-3-1.
- 27 Mulawka J.: *Systemy ekspertowe*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- 28 Osowski S.: *Modelowanie układów dynamicznych z zastosowaniem języka Simulink*. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997. ISBN 83-7207-003-2.
- 29 Perepeczko A.: *Okrętowe urządzenia sterowe*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1983.
- 30 Piliński M., Rutkowska D., Rutkowski L.: *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Łódź 1999. ISBN 83-011-2304-4.
- 31 Sobczyk J. T.: *Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2004. ISBN 83-204-2886-6.
- 32 Sołdek J.: *Automatyzacja statków*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1985.
- 33 Śmierzchalski R.: *Automatyzacja i sterowanie statkiem*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013. ISBN 978-83-734848-7-0.
- 34 Śmierzchalski R.: *Automatyzacja systemu elektroenergetycznego statku*. Wydawnictwo Gryf, Gdańsk 2004. ISBN 83-9211-105-2.
- 35 Zajczyk R.: *Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów regulacyjnych*. Seria wydawnicza sekcji Sekcji Systemów Elektroenergetycznych Komitetu Elektrotechniki PAN. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2003. ISBN 83-7348-049-8.

II. Artykuły:

- 36 Alonge F., D'Ippolito F., Raimondi F. M.: *Last squares and genetic algorithms for parameter identification of induction motors*. Control Engineering Practice 9, 2001, s. 647–657.
- 37 Al-Jufout S. A.: *Modeling of the cage induction motor for symmetrical and asymmetrical models of operation*. Computers and Electrical Engineering 29, 2003, s. 851–860.
- 38 Arendt R.: *The application of expert system for simulation investigation in the aided design of ship power system automation*. Expert system with applications, 27, 2004, s. 493–499.
- 39 Arendt R.: *Wykorzystanie modeli systemu elektroenergetycznego statku*. Przegląd elektrotechniczny, 8/2011.
- 40 Arendt R., Kopczyński A.: *Analiza możliwości zastosowania środowiska Scilab do wspomagania projektowania podsystemów energetycznych statków*. Pomiary Automatyka Robotyka 2/2009, Warszawa 2009. ISSN 1427-9126.
- 41 Arendt R., Kopczyński A.: *Badania symulacyjne rozruchu silnika indukcyjnego steru strumieniowego statku*. Pomiary Automatyka Robotyka 2/2011, Warszawa 2011.
- 42 Arendt R., Kopczyński A.: *Dobór parametrów silnika indukcyjnego dużej mocy*. Pomiary Automatyka Robotyka 2/2012, Warszawa 2012. ISSN 1427-9126.
- 43 Arendt R., Kopczyński A.: *Wykorzystanie środowiska ekspertowego do projektowania wybranych podsystemów energetycznych statków*. Pomiary Automatyka Robotyka 2/2007, Warszawa 2007. ISSN 1427-9126.

- 44 Arendt R., Kopczyński A.: *Zastosowanie modeli matematycznych przy projektowaniu podsystemów energetycznych statków*. Pomiary Automatyka Robotyka 2/2008, Warszawa 2008. ISSN 1427-9126.
- 45 Arendt R., Kopczyński A., Wojtczak M.: *The Choice of Parameters of Induction Motor Model Using a Genetic Algorithm*. 10th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2004, Międzyzdroje, 30 August – 2 September 2004 s. 149–154.
- 46 Arendt R., Kopczyński A., Wojtczak M.: *Zastosowanie modeli matematycznych przy projektowaniu steru strumieniowego i napędu elektrycznego statku*. XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa 2005, s. 105–110. ISBN 83-89475-02-2.
- 47 Dommel H. W., Kundur P., Lindenmeyer D., Moshref A.: *An induction motor parameter estimation method*. Electrical Power and Energy Systems 23, 2001, s. 251–262.
- 48 Fossen T. I.: *Preface to the special selection on control applications in marine systems*. Control Engineering Practice 4, 1996, s. 341–342.
- 49 Guang-kai Li., Geng-yin Li.: *The Summary of Power System Simulation Software*. Journal of Electrical & Electronic Engineering Education, 2005.
- 50 Helvacioğlu S., Insel M.: *Expert System Applications in Marine Technologies*. Ocean Engineering, Vol:35, August 2008, s. 11–12.
- 51 Karolewski B., Ligocki P.: *Zmiany parametrów ruszającego silnika klatkowego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr. 54, Wrocław 2003.
- 52 Kopczyński A.: *Badania symulacyjne prowadzone w środowisku systemu ekspertowego stosowane do wspomagania projektowania układów automatyki statku*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2014, s. 61–64. ISSN 2353-1290.
- 53 Mosterman P. J., Biswas G.: *A comprehensive methodology for building hybrid models of physical systems*. Artificial Intelligence, 121, 2000, s. 171–209.
- 54 Ogbuka C. U., Agu M. U.: *A modified approach to induction motor stator voltage and frequency control*. WCE London, 2011.
- 55 Park, J. H., Storch, R. L.: *Overview of ship-design expert systems*. Expert Syst. 19, 2002, s. 136–141.
- 56 Tsong-Neng W., Jenhwa G., Yih-Nan C., Wen-Ching C.: *Control systems design and performance evaluation of anti-pitching fins*. Marine science and technology 4, 1999, s. 117–122.
- 57 Zajczyk R.: *Sterowanie pracą elektroenergetycznego węzła wytwórczego w stanach nieustalonych*. Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka Nr 542, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996.
- 58 Arendt R., Kopczyński A., Wojtczak M.: *Aplikacja wspomagająca analizę i projektowanie elektrycznego zespołu steru strumieniowego oraz napędu głównego statku*. Praca wykonana w ramach grantu 4T11A00925 KBN, Gdańsk 2005.
- 59 Arendt R., Kopczyński A., Wojtczak M.: *Dobór modeli matematycznych, identyfikacja parametrów wybranych typów elementów składowych podsystemu energetycznego statku*. Praca wykonana w ramach grantu 4T11A00925 KBN, Gdańsk 2003.
- 60 Arendt R., Kopczyński A., Wojtczak M.: *Dobór modeli matematycznych, identyfikacja parametrów wybranych typów elementów składowych podsystemu energetycznego statku, określenie obszaru adekwatności opracowanie metod identyfikacji silników asynchronicznych*. Praca wykonana w ramach grantu 4T11A00925 KBN, Gdańsk 2004.

- 61 Arendt R., Kopczyński A., Wojtczak M.: *Strojenie i dobór modeli matematycznych, identyfikacja parametrów wybranych typów elementów składowych podsystemu energetycznego statku, określenie obszaru adekwatności*. Praca wykonana w ramach grantu 4T11A00925 KBN, Gdańsk 2004.
- 62 Arendt R., Kopczyński A., Kowalski Z., Wojtczak M.: *Hybrydowe modele matematyczne, identyfikacja parametrów wybranych typów elementów składowych podsystemu energetycznego statku*. Praca wykonana w ramach grantu 4T11A00925 KBN, Gdańsk 2004.
- 63 Dziworski J., Kowalski Z., Meler-Kapcia M., Olejnik B.: *Baza danych systemów i urządzeń okrętowych w zakresie automatyki siłowni dla projektu technicznego Etap II cz.1*. Praca wykonana w ramach grantu 8T11A00813 KBN, Gdańsk 1998.
- 64 Dymarski C., Wieliczko L., Nalewajski A.: *Analiza techniczna i statystyczna rozwiązań konstrukcyjnych i układów sterowania oraz określenie założeń projektowych sterów strumieniowych*. Prace badawcze nr 53/SPB. Eureka/2003, Gdańsk 2003.

III. Inne źródła:

- 65 GEATbx: *Genetic and evolutionary algorithm tool box for use with Matlab User's Guide*. University of Sheffield, Department of Automatic Control and Systems Engineering, Sheffield 1995.
- 66 Exsys: *Professional for Windowed Environments*. Manual Cz. 1 i Cz. 2, 1996.
- 67 ABB Zamech: *Ster strumieniowy z rozruchem autotransformatorowym TYP375TV-ULSTEIN, dokumentacja OS-2980-814V.1*, 1995.
- 68 ABB Zamech: *Ster strumieniowy z rozruchem gwiazda-trójkąt*, dokumentacja F250Z2, 1992.
- 69 ABB Zamech: *Silnik indukcyjny AMA 400L6D VAMH 800 kW*. Dokumentacja 4902HD200/201, Helsinki 2000.
- 70 ABB Zamech: *Materiały katalogowe sterów strumieniowych typu FTP oraz CPT*, 2004.
- 71 ABB Zamech: *Uproszczona specyfikacja techniczna napędu elektrycznego steru strumieniowego 1700kW*, Gdańsk 2003.
- 72 CTO – Centrum techniki okrętowej [online]: *Projekt EUROMIND*, http://www.cto.gda.pl/fileadmin/Inne_pdfy/Projekt_EUROMIND.pdf, 2015.
- 73 Brunvoll thruster: *Thrusters for manoeuvring and propulsion of ships*. Dokumentacja techniczna, Norwegia 2001.
- 74 Germanischer Lloyd: *Rules for Classification*, 1998.
- 75 Hudy W.: *Projektowanie układów sterowania oraz identyfikacja parametrów silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych i różnych kryteriów jakości*. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2006.
- 76 Komisja Europejska [online]: <http://cordis.europa.eu>, 2015.
- 77 Lloyd Register: *Lloyd Register of Shipping Rules for Classification*, 1999.
- 78 Matlab [online]: *User's Guide. The MathWorks Inc.*, <http://www.mathworks.com>, 2015.
- 79 Otwarte oprogramowanie [online]: <http://pl.wikipedia.org>, 2014.
- 80 Polski Rejestr Statków [online]: <http://www.prs.pl>, 2014.
- 81 Scilab [online]: *Manuals*. INRA, <http://www.scilab.org>, 2014.
- 82 Dane techniczne steru strumieniowego 8276-WT 1700 kW. Biuro projektowe stoczni, Gdynia 2003.